

Aus dem Anatomischen Institut der Universität Basel

Vorsteher: Prof. Dr. med. et phil. G. Wolf-Heidegger

Arbeit unter Leitung von Prof. Dr. K. S. Ludwig

Die Frühentwicklung der Scapula beim Menschen

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät der Universität Basel

vorgelegt von

Peter Elmiger

von Basel und Ermensee (LU)

1965



19

66

BASEL (Switzerland)

S. KARGER

NEW YORK

Von der Medizinischen Fakultät Basel
genehmigt auf Antrag von Prof. Dr. K.S. LUDWIG

Tag der Promotion: 6. Juli 1965



Erschienen in «Acta Anatomica» Vol. 65, No. 3, pp. 58–137 (1966)

Aus dem Anatomischen Institut der Universität Basel, Schweiz
Vorsteher: Prof. Dr. med. et phil. G. Wolf-Heidegger

Die Frühentwicklung der Scapula beim Menschen

PETER ELMIGER

Inhalt

Einleitung	58
Nomenklatur	59
Literaturübersicht	63
Material und Technik	66
Befunde	67
Ergebnisse und Diskussion	113
Zusammenfassung	133
Literatur	136

Einleitung

Die Embryonalentwicklung der menschlichen Scapula ist in den gebräuchlichen Lehr- und Handbüchern der Anatomie und der Entwicklungsgeschichte nur kurz und flüchtig oder gar nicht dargestellt. Insbesondere wird die histologische Frühentwicklung vor Ossifikationsbeginn kaum erwähnt. Wo die Autoren etwas ausführlicher über die ersten Stadien der Scapulaentwicklung berichten (*Bardeen* [1910] u. a.), stützen sie sich auf die grundlegende Arbeit über die Entwicklung der oberen Extremitäten von *Lewis* [1901].

In der Literatur existieren nur wenige Arbeiten, die anhand eines größeren Untersuchungsmaterials über die Entwicklung der ganzen Scapula Auskunft geben (vgl. *Dijkstra* [1923], *Zawisch* [1954], *Olivier* [1962]). Genauere Befunde über die Histologie von Knorpel und Perichondrium während der Frühentwicklung finden sich in den genannten Arbeiten nur lückenhaft oder fehlen ganz. Sehr frühe Stadien sind darin nicht oder hauptsächlich in ihrer formalen Entwicklung beschrieben. Aus den Angaben über das erste Auftreten und über die Form der einzelnen Scapulateile ergeben sich Widersprüche.

Das Bild wird nicht klarer, wenn man die Ergebnisse der Arbeiten vergleicht, die sich auf ein kleines Untersuchungsmaterial stützen, die nur nebenbei von der Scapulaentwicklung handeln oder die nur einzelne Teile der Scapula in ihrer Entwicklung verfolgen (vgl. die Arbeiten von *Hagen* [1900], *Lewis* [1901], *Fawcett* [1910], *Rutherford* [1914], *Frey* [1919], *Nauck* [1926], *Subkowitsch* [1931], *Ciardi-Dupré* [1942], *Hochstetter* [1952], *Gardner* und *Gray* [1953], *Andersen* [1963]).

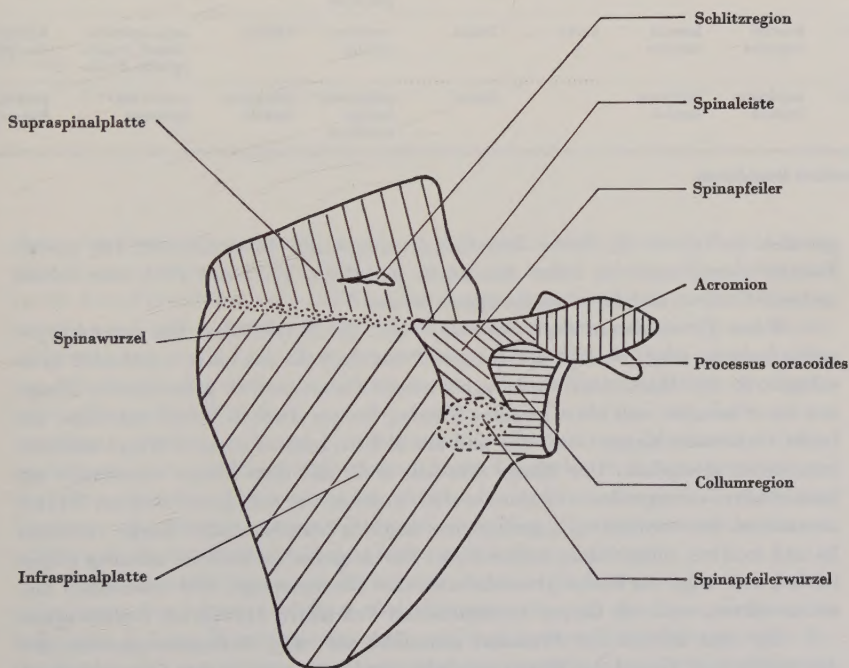
¹ Die Arbeit wurde auf Anregung und unter Leitung von Prof. Dr. K. S. Ludwig durchgeführt.

Wir haben es daher unternommen, die Frühentwicklung der menschlichen Scapula bis zum Auftreten einer histochemisch nachweisbaren Verkalkung zu untersuchen. Die Lageveränderungen der Scapula und die Stellungsänderungen ihrer Facies glenoidalis während der Frühentwicklung sind von *Olivier* [1962] ausführlich beschrieben worden. Uns interessierten an der Scapula insbesondere Struktur und Funktion des Perichondriums sowie die Vorgänge bei der Chondrogenese. Um einen Bezugspunkt zu haben, vergleichen wir die Verhältnisse bei der Scapula, einem Vertreter der platten Knochen, mit denen beim Humerus (*Streeter* [1949]) als Vertreter der Röhrenknochen. Zur besseren Abgrenzung sowie zur Darstellung von Differenzen im Reifegrad oder in der Wachstumsgeschwindigkeit des Knorpelgewebes und des Perichondriums wandten wir Spezialfärbungen und histochemische Reaktionen an.

Nomenklatur

Für die Beschreibung der Entwicklungsvorgänge an der Scapula findet man in den BNA, JNA und PNA zu wenige Ausdrücke. Wegen einer schon während der Frühentwicklung einsetzenden Drehung der Scapula von der Sagittalebene in die Frontalebene sind viele offizielle Lagebezeichnungen ungünstig, da sie nicht unabhängig von der Stellung der Scapula sind.

In der Literatur über die Scapulaentwicklung werden die einzelnen Scapula-teile sehr uneinheitlich bezeichnet und offizielle Begriffe häufig mißverständlich an-



Schema I. Embryonale Scapula von der Kutanseite. (Umriss nach einem Wachstapfenmodell der Scapula eines 30-mm-Embryos von *Rutherford* [1914].)

Tabelle I. Synonyme der Lagebezeichnungen und Scapulateile

Autor	Kranial*	Kaudal*	Kostal*	Kutan*	Vertebral*	Axillär*	Supraspinal- platte*	Infraspinal- platte*
<i>Vesalius</i> [1555]	superior	inferior	anterior	posterior externus			pars superior	
<i>Lewis</i> [1901]	anterior	posterior	medial median	lateral	vertebral		median lip of the body anterior border	
<i>Krause</i> [1909]					vertebral medial	axillär	über dem Acromion gelegener Teil	
<i>Bardeen</i> [1910]			costal medial			lateral		
<i>Rutherford</i> [1914]		caudal	medial	superficial	vertebral dorsal	lateral	supraspinous element, part, portion praescapula	lower blade, blade, main part of the blade postscapula
<i>Frey</i> [1919]			ventral	dorsal	vertebral	axillär lateral		Hauptteil
<i>Dijkstra</i> [1923]	kranial superior		kostal medial	lateral	vertebral	anterior	margo superior bovenste deel (oberster Teil)	subspinale deel
<i>Subkowitsch</i> [1931]	kranial	kaudal	ventral	dorsal	medial	lateral	Suprascapula	
<i>[Ciardi-Dupré</i> 1943]	superior		anterior medial	dorsal lateral	dorsal medial posterior	lateral	parte superiore del corpo	corpo
<i>Zawisch</i> [1954]	kranial superior	kaudal inferior	kostal	kutan	vertebral medial	lateral	supraspinaler Anteil, supra- spinale Platte	Körper Hauptteil
<i>Olivier</i> [1962]	supérieur cranial	inférieur caudal		dorsal	postérieur médial vertébral	antérieur latéral	partie sus- épineuse	partie sous- épineuse

* von uns benützte Bezeichnung

gewandt (s. Tabelle I). Unter dem Gesichtspunkt der Brauchbarkeit für unsere Zwecke übernehmen wir daher Ausdrücke der BNA, JNA und PNA oder solche anderer Autoren und fügen einige eigene hinzu.

Beim Erwachsenen (vgl. Schema I, das die Verhältnisse bei der embryonalen Scapula zeigt) besteht der Hauptteil der Scapula aus einer annähernd dreieckigen, in der Horizontal- und Sagittalebene kutan-konvex gekrümmten Platte mit einer *kutanen* und einer *kostalen* Fläche, die am dünnen Margo cranialis, am leicht verdickten Margo vertebralis und am dicken, leistenförmigen Margo axillaris ineinander übergehen. Der Margo cranialis trifft mit dem Margo vertebralis am kranialwärts vorragenden Angulus cranialis unter einem annähernd rechten Winkel zusammen. Am verdickten, abgerundeten Angulus caudalis stoßen Margo vertebralis und axillaris spitzwinklig aufeinander. Der Angulus axillaris ist mächtig aufgetrieben und trägt die Facies glenoidalis für den Humeruskopf. Wir bezeichnen diesen massiven, auch als Corpus beschriebenen Teil (Hyrtl [1877]) als *Collumregion*.

Ihr sitzt kranial der *Processus coracoides* auf; sein Auflagerungsgebiet, das den axillärsten Viertel des Margo cranialis einnimmt, nennen wir *Coracoidwurzel*. Der *Processus coracoides* verläuft in kranial-konvexem Bogen nach kranial, axillär und – in verschiedenem Maße – nach kostal. Auf der Kutanseite ist der Knochen-

Tabelle I. (Fortsetzung)

Spinapfeiler*	Acromion*	Processus coracoides*	Spinawurzel*	Spinaleiste*	Schlitz*
	superior processus summus humerus	processus interior	radix spinae	scapulae spinae pars crassior	
Acromion process		coracoid process			
Acromion		processus coracoides			
processus acromialis (Acromium)		processus coracoideus			
Acromion		coracoid	basis of support for the spine		interval
Acromion		processus coracoides Coracoid			Lücke
processus acromialis		processus coracoideus			foramen
Acromion		processus coracoides			
Acromion					
aufsteigender Ast des Acromions		Coracoid			Lücke
Acromion					
colonne ascendante console	Acromion	apophyse coracoide			orifice

platte die *Spina*, ein in der Normalebene liegender Knochenkamm von der Form eines Rosenstachels aufgepfropft, dessen Spitze sich in das sichelförmig gekrümmte, kranio-kostal gerichtete, weit axillärwärts vorragende *Acromion* fortsetzt. Die *Spina* beginnt am *Angulus vertebralis* sich nach kutan zu erheben und läuft dann beinahe horizontal, nur wenig kranialwärts ansteigend nach axillär. Sie geht gerade axillär von der *Facies glenoidalis* ins *Acromion* über. Das Auflagerungsgebiet der *Spina* auf der Kutanfläche der Scapulaplatte, das wir nach *Vesal* [1555] als *Radix spinae* bezeichnen, reicht vom *Margo vertebralis* axillärwärts bis zum Beginn der *Collumverdrückung*. Vom vertebral verbreiterten Ende der *Radix* zieht die *Spinaleiste* als verdickter, kutaner Randwulst nach axillär. Sie trifft an der Grenze gegen das *Acromion* sehr spitz zusammen mit dem *Spinapfeiler*, der vom stark verbreiterten axillären Ende der *Radix* im Bogen kutan-axillärwärts aufsteigt.

Die Spinawurzel unterteilt die Scapulaplatte in eine *Supra-* und in eine *Infra-*scapularplatte. Die Suprascapularplatte schließt unmittelbar an den kranialwärts aufsteigenden Teil des *Processus coracoides* an. Nach kurzem Verlauf ist sie durch die verschieden tief ausgebildete *Incisura scapulae* eingekerbt, die jedoch kaudalwärts nie bis zur Spinawurzel reicht. Die Suprascapularplatte bildet mit der Infrascapularplatte einen nach kostal offenen stumpfen Winkel.

Zur Bezeichnung von Knorpelgewebe verschiedener Reife

Zur Angabe der Knorpelreife benützen wir die Einteilung in fünf Stadien, die Streeter [1949] bei der Humerusentwicklung beschrieben hat. Diese *fünf Stadien*, die wir mit *I, II, III, IV und V* bezeichnen, sind auch in der Scapula vorhanden und sehen sehr ähnlich aus wie im Humerus.

Vom Blastem bis zum Stadium I durchläuft der Knorpel in der Scapula zumindest zwei morphologisch abgrenzbare Vorstadien, die Streeter [1949] beim Humerus nicht beschrieben hat, aber für unsere Zwecke von Bedeutung sind. Die meist dichtgepackten, polymorphen Kerne des Blastems sind durchschnittlich größer als die vorwiegend rundlichen, weiter auseinander liegenden Kerne des umgebenden Mesenchyms. Die Blastemkerne können regellos oder auffallend regelmäßig angeordnet sein. Wir setzen den Beginn der Knorpelbildung auf den Moment fest, wo die Blastemkerne auseinanderzurücken beginnen und zwischen sich eine in der Azanfärbung grau erscheinende Interzellulärsubstanz erkennen lassen, deren Grauwert je nach Ausführung der Azanfärbung variiert. Gleichzeitig werden die Kerne im Blastem größer, etwas chromatinärmer und weniger polymorph; sie haben vorwiegend eine ovoide Form. Die Kernlängsachsen stehen ungeordnet zueinander und die Kernabstände sind verschieden groß. Diese früheste Form von Knorpel bezeichnen wir als *Stadium A* (Abb. 1). Danach ordnen sich die zunehmend gleichförmiger ovoid bis plattoval aussehenden Kerne in bogenförmigen Reihen an, die auf Querschnitten durch die Scapulaplatte zu sehen sind und sowohl kosta- wie kutan unter spitzem Winkel zum Perichondrium ziehen. Bei Azanfärbung läßt die kaum vermehrte, grau bis blaßblau gefärbte Interzellulärsubstanz kleine Höhlen frei, die von den Knorpelzellen nur etwa zu zwei Dritteln ausgefüllt werden, während ein Drittel als optisch leerer Hof erscheint. Diese zweitjüngste Knorpelform bezeichnen wir als

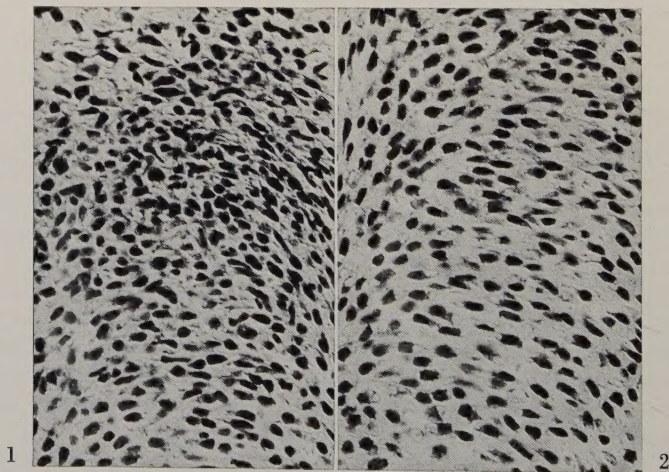


Abb. 1. Embryo B2, 11 mm SSL, quer, 6μ , Schnitt 41/3/2, Vergr. $290\times$. Schnitt durch den kranialsten Teil der Infraspinalplatte. Knorpel in Stadium A (s. Text S. 62). Oben im Bild Blastem.

Abb. 2. Gleicher Schnitt wie Abb. 1, Vergr. $290\times$. Knorpel in Stadium B (s. Text S. 62). Oben im Bild Stadium A.

Stadium B (Abb. 2), auf welches das typische, von *Streeter* [1949] als Stadium I bezeichnete folgt; allerdings mit der Einschränkung, daß wir im Unterschied zu seinen Angaben auch hier bereits eine geringe Vakuolisierung des Cytoplasmas beobachteten. *Streeter* [1949] beschreibt erst für das Stadium II eine gewisse Vakuolisierung des Cytoplasmas; die unterschiedlichen Angaben dürften jedoch auf die zur Untersuchung verwendete Schnittdicke zurückzuführen sein: Sie betrug bei *Streeter* [1949] 40 μ , bei uns 6–8 μ . Bei der Entwicklung von Stadium B zu I geht die Reihenanordnung der Kerne verloren. Die Kerne werden etwas größer und gleichförmig kugelig oder würfelförmig. Die Abstände zwischen ihnen sind regelmäßig und nehmen gegenüber dem Stadium B ein wenig zu.

Zur Nomenklatur der Ossifikationsvorgänge

Unter der *perichondralen Ossifikation* versteht man eine Art der Knochenbildung, bei der vom Perichondrium gebildetes Knochengewebe dem anstoßenden Knorpelgewebe direkt aufgelagert wird. Dieser Ossifikationstyp ist auch bei der Scapula zu finden. Daneben ist jedoch noch eine früher auftretende Art der Knochenbildung, die mit der desmalen Ossifikation vergleichbar ist, anzutreffen: Mitten im lockeren Perichondriumblastem entstehen Ossifikationsherde, die keinen Zusammenhang mit dem Knorpelgewebe haben, d.h. sie werden durch die tieferen Lagen des Perichondriumblastems vom Knorpel getrennt. Um ihre Andersartigkeit zu betonen, nennen wir sie *intraperichondrale Ossifikationsherde*. Sie gewinnen sekundär Anschluß an die perichondralen Ossifikationsgebiete.

Literaturübersicht

Die Literatur über die embryonale Entwicklung der menschlichen Scapula ist nicht umfangreich.

Von den Autoren der gebräuchlichen Lehr- und Handbücher der Anatomie und der Entwicklungsgeschichte erwähnen *Hyrtl* [1887], *Nauck* [1938] und *Hamilton* [1956] nichts von der Frühentwicklung der menschlichen Scapula.

Rauber [1902], *Hertwig* [1906], *Langer-Toldt* [1921], *Sobotta* [1921], *Fischel* [1937], *Testut und Latarjet* [1948] und *Alverdes* [1959] stellen summarisch fest, die Scapula sei anfangs ein Knorpel von ähnlicher Gestalt wie beim Erwachsenen und beginne am Ende des zweiten oder am Anfang des dritten Embryonalmonats in der Collumregion zu verknöchern.

Bardeen [1910], *Bryce* [1915] und *Corning* [1925] berichten in enger Anlehnung an *Lewis* [1901] ausführlicher über die Frühentwicklung der knorpelig angelegten Scapulateile und fügen bei, die Verknöcherung beginne im Gebiet der Collumregion.

Gegenbaur [1899] und *Benninghoff-Goertler* [1957] erwähnen namentlich, die Verknöcherung beginne perichondral in der Nähe des Collum, einen Vorgang, den *Bardeleben* [1906] und *Krause* [1909] näher beschreiben und durch die Angabe ergänzen, die Verkalkung des Knorpels trete erst nachträglich, d.h. nach Ossifikationsbeginn ein.

Die Arbeiten über oder mit Angabe einzelner Befunde über die Frühentwicklung der Scapula geben größtenteils nur eine lückenhafte und durch Widersprüche erschwerte Vorstellung vom Ablauf der formalen und histologischen Veränderungen.

Hagen [1900] hat das Knorpelskelet eines Embryos von 17 mm SSL rekon-

struiert. Mit Ausnahme der Spina, die fast vollständig fehlt, sind alle Anteile der Scapula des Erwachsenen in ihrer Anlage vorhanden; insbesondere ist die Supraspinalplatte deutlich ausgebildet.

Lewis [1901] stellt in einer grundlegenden Arbeit über die Entwicklung der oberen Extremität auch die Vorgänge an der Scapula dar, wobei er sich auf Untersuchungen an 9 Embryonen von 3,5 bis 20 mm Länge stützt. Beim 9-mm-Embryo erwähnt er zum ersten Mal das Auftreten einer mit dem Humerus kontinuierlichen Scapulaanlage aus dichtgepackten Mesenchymzellen, an der weder ein Processus coracoides noch ein Acromion zu erkennen ist, beim 11-mm-Embryo eine «vorknorpelige» Scapula mit Processus coracoides und Acromion und beim 16-mm-Embryo eine weitgehend knorpelige Scapula mit einem dicken Perichondrium. Auf den Modellen der beiden letztgenannten Stadien ist eine deutliche Supraspinalplatte zu erkennen.

Fawcett [1910] hat zur Darstellung der Histogenese der Clavicula ein Modell des Schultergürtels bei einem 19-mm-Embryo verfertigt. Er beschreibt daran einen gut ausgebildeten, hakenförmigen Processus acromialis und eine Spina, die nur aus einer niedrigen Leiste unterhalb des *M. supraspinatus* besteht. Man erkennt auf dem Modell eine große Scapulaplatte mit einem langen, dreieckigen infraspinalen und einem kurzen, auffallend dünnen supraspinalen Teil, wogegen Acromion und Processus coracoides klein sind.

Rutherford [1914] diskutiert ausgehend von Modellen eines 20-mm- und eines 30-mm-Embryos und vergleichenden Beobachtungen an fünf Embryonen von 8 bis 25 mm SSL die Entwicklung der einzelnen Teile der oberen Extremität. Auf den beiden Modellen ist eine gut ausgebildete Supraspinalplatte mit einem Schlitz in der Mitte zu sehen. Er bezeichnet den kranial vom Schlitz gelegenen Teil der Supraspinalplatte als Praescapula, den kaudalen Teil als Postscapula. Durch vergleichende Untersuchungen mit Cetaceen kommt er zum Schluß, die Praescapula stelle einen separaten morphologischen Bestandteil der Scapula dar. Er betont die späte Entwicklung der Spina.

Frey [1919] untersucht in ihrer Arbeit über die Entwicklung der menschlichen Unterarmmuskeln und der mit ihnen verbundenen Skeletteile die Scapula bei einem Embryo von 30 mm SSL. Sie beschreibt eine Lücke am Oberrand der Scapula, in deren Umgebung das Gewebe modifiziert ist, die Ausdehnung von Knorpelgewebe verschiedener Reife sowie den Vorgang der perichondralen Ossifikation. Unseres Wissens macht sie die ersten genaueren histologischen Angaben, aus denen die Reifeverteilung im Knorpel der embryonalen Scapula ersichtlich ist.

Dijkstra [1923] stützt sich in seiner Arbeit über die Entwicklung der menschlichen Scapula auf die Befunde bei 18 Embryonen mit Längen von 16 bis 120 mm. Er legt das Hauptgewicht auf die Beschreibung der Entwicklung von Spina und Supraspinalplatte bei Embryonen von über 40 mm Länge und macht dabei ausführliche histologische Angaben. Von den frühesten Stadien teilt er nur Befunde über die Formentwicklung mit. Beim 16-mm-Embryo findet er eine Scapulaform, die weitgehend der des Erwachsenen entspricht, mit einer Fovea unter dem Angulus superior. Auf seinem Modell ist eine gut ausgebildete Supraspinalplatte vorhanden, jedoch stellt er das Fehlen einer Spina und der Incisur fest. Bei einem 25-mm-Embryo beobachtet er anstelle der Fovea ein Foramen in der Supraspinalplatte.

Nauck [1926] hat anhand eines kleinen Untersuchungsmaterials das Coracoid

des Menschen mit dem des Schweines in ihrer Entwicklung verglichen. Er stellt fest, daß der Coracoidanteil der Fossa glenoidalis im Laufe der Entwicklung reduziert wird und schließlich ganz verschwindet.

Subkowitsch [1931] beschäftigte sich ausgehend von Beobachtungen an menschlichen Embryonen von zirka 13 bis 27 mm SSL und an Embryonen von Fledermäusen mit der Frage der Homologisierung des Coracoids mit dem Processus coracoides des Menschen und kommt zum Schluß, daß nur die Basis des Processus coracoides beim Menschen dem Coracoid niederer Formen homolog sei, während der restliche Anteil eine Neubildung darstelle. Noch bei einem Embryo von 18 mm SSL beobachtet er eine Grenze zwischen der Basis des Processus coracoides und der restlichen Scapula.

Ciardi-Dupré [1942] hat an 42 Embryonen, von denen die 14 jüngsten eine SSL von 21 bis 34 mm aufweisen, die Scapulaentwicklung im Zusammenhang mit der lateralen Insertion des M. omohyoideus untersucht. Er macht formale und ausführliche histologische Angaben über die Supraspinalplattenentwicklung. In der Supraspinalplatte unterscheidet er zwei bis drei Anteile, deren Lagebeziehungen dem Text nur unvollständig zu entnehmen sind. Ebenso ist die Lage der von ihm beschriebenen Schlitzbildung in Beziehung zu den verschiedenen Supraspinalplattenanteilen nicht ersichtlich. Von besonderem Interesse sind seine Beschreibung eines subperichondralen Saumes junger Knorpelzellen in der Scapulaplate und des Beginns der Ossifikation im Perichondrium.

Hochstetter [1952], der bei einer großen Zahl von Embryonen zwischen 3,2 und 84 mm größter Länge die äußere Form der Extremitätenanlagen mit Akribie beschrieben hat, macht auch einige Angaben über die Scapula. Wir erwähnen hier nur, daß er bei einem 10,4-mm-Embryo ein Scapulablastem beobachtet hat, von dem er annimmt, es handle sich um die Spinaanlage.

Gardner und Gray [1953] teilen in ihrer Arbeit über die Entwicklung von Schulter- und Acromioclaviculargelenk beim Menschen auch Befunde über die Scapulaentwicklung mit, wovon für uns die Beobachtungen bei sieben Stadien von 12–28 mm SSL von besonderem Interesse sind. Sie machen kurze Angaben über die Form und das histologische Bild einzelner Scapulateile und des Perichondriums. Beim 12-mm-Stadium beschreiben sie eine hauptsächlich vorknorpelige Scapulaplate, im Verhältnis zu der das Acromion und der Processus coracoides groß erscheinen, beim 20-mm-Stadium das erste Auftreten der Spina und beim 28-mm-Stadium den Ossifikationsbeginn in der Collumregion.

Zawisch [1954] ist für ihre Untersuchung der Morpho- und Histogenese der menschlichen Scapula von einer ungenannten Zahl menschlicher Embryonen ausgegangen, die eine SSL zwischen 16 und 30 mm aufweisen. Im Zentrum ihrer Betrachtungen steht die Ossifikation, während sie die Frühentwicklung nur summarisch darstellt. Sie verneint das Vorhandensein von Anlagen der Supraspinalplatte und der Spina bei Embryonen unter 30 mm SSL. Im Gegensatz zu *Gegenbaur* [1899] u. a. stellt sie eine Verkalkung des Knorpels vor dem Beginn der perichondralen Ossifikation fest.

Olivier [1962] stützt sich bei der Beschreibung der Embryonalentwicklung der Scapula auf Befunde an 14 Embryonen von 9–34 mm SSL, von denen er bei sechs Embryonen Rekonstruktionen der Scapula und teilweise auch des Thoraxskelets anfertigte. Sein Hauptinteresse gilt der Formentwicklung, wogegen er die Histogenese nur streift. Während die übrigen Autoren Spinapfeiler und Acromion

zusammen als Acromion bezeichnen, macht er – unseres Wissens als Erster – eine klare Unterscheidung in einen Spinaanteil und in das apikal aufsitzende Acromion. Nach ihm ist das Acromion ein eigenständiger, erst beim 17-mm-Embryo auftretender Anteil, im Gegensatz zur Darstellung von *Lewis* [1901] u. a. Obwohl auf allen seinen Rekonstruktionen eine deutliche Supraspinalplatte vorhanden ist, legt er sich nicht darauf fest, dieses Gebilde als Anlage der adulten Supraspinalplatte zu bezeichnen. Er beschreibt die Lageveränderungen der Scapula und die Entwicklung der Facies glenoidalis ausführlich; dagegen berücksichtigt er das vom Skeletblastem nach der primären Knorpelbildung übrigbleibende Perichondriumblastem in seiner Darstellung nur wenig.

Andersen [1963] hat zur Darstellung der Entwicklung von Schulter- und Acromioclaviculargelenk 49 menschliche Embryonen untersucht, unter ihnen 20 mit einer SSL von 11 bis 34 mm. Auffallend ist, daß seine die Reife betreffenden Angaben über die Scapula bei den Embryonen bis zu 32 mm SSL auch unter Berücksichtigung der großen Variationsbreite vorverlegt scheinen, wenn man sie mit denen anderer Autoren und unseren Befunden vergleicht, während bei den Embryonen von 33 mm und größeren SSL gerade das Umgekehrte zutrifft. So findet er schon bei einem 12-mm-Embryo-Knorpel im Stadium II bis III, bei einem 20-mm-Embryo eine hyalinknorpelige Spina und beim 23 mm reichlich Gefäße im Perichondrium, dagegen erst beim 33-mm-Stadium eine spärliche perichondrale Ossifikation. Die Abweichungen gegenüber den Angaben anderer Autoren sind möglicherweise auf die Messung der jüngeren Embryonen nach der Fixation zurückzuführen. Dieses Vorgehen erwähnt der Autor in der vorliegenden Arbeit nicht besonders, wohl aber in einer vorhergehenden (*Andersen* [1961a]), in der zum großen Teil Embryonen mit gleichen Längen aufgezählt werden. Auffällig ist auch seine Angabe, der reifste Knorpel finde sich zentral in der Scapula, wogegen die übrigen Autoren die exzentrische Lage betonen.

Material und Technik

Wir untersuchten ausschließlich Schnittserien menschlicher Embryonen, die teils der Sammlung des Anatomischen Instituts Basel entnommen, teils aus frischen Embryonen für unsere Zwecke speziell hergestellt wurden.

Aus der Institutssammlung benützten wir 37 Embryonen von 8–34 mm SSL. Davon sind 31 Embryonen in Bouin fixiert, in Paraffin eingebettet, zu Schnittserien von 6–8 μ Dicke verarbeitet und mit Azan gefärbt worden. Für sechs Embryonen war das Procedere ein anderes: Fixation in Carnoy, Einbettung in Paraffin und Verarbeitung zu Schnittserien von 7 μ Dicke. An vier dieser Embryonen wurde anschließend die Methylgrün-Pyronin (MP) Reaktion in der Modifikation nach *Schenk* [1957]) und die Polysaccharidreaktion nach *Bauer* (*Romeis* [1948] § 1104) durchgeführt. Mit den beiden anderen Embryonen wurde nach dem Schneiden wie folgt verfahren: Reihen von zirka 10 Schnitten sind auf Platten gelegt, entparaffiniert, mit Azan gefärbt und zur Herstellung von Folien mit Cyclonlack überzogen worden. Daneben wurden pro Reihe an je einem Schnitt auf separaten Objektträgern nach dem Entparaffinieren die MP-, die Polysaccharid- (beide wie oben) und die Perjodic-Acid-Schiff (PAS)-Reaktion nach *Lillie* und *Greco* (*Lison* [1953]) ausgeführt.

An sechs frischen Embryonen von 18–35 mm SSL haben wir den Brust-

abschnitt mit beiden Oberarmen isoliert oder ein Stück der hinteren Thoraxwand samt Scapula und Oberarm herauspräpariert, in Carnoy fixiert und in Paraffin eingebettet. Die so erhaltenen Präparate schnitten wir in Serien von 6–8 μ Dicke, wobei wir darauf achteten, die Schnittrichtung entsprechend den quer resp. frontal geschnittenen Embryonen aus der Institutssammlung zu wählen.

Bei allen Schnitten wurden abwechselungsweise je auf einem Objektträger folgende Färbungen durchgeführt:

Azanfärbung nach *Heidenhain* (*Romeis* [1948] § 1489)

PAS-Reaktion (wie oben)

MP-Reaktion (wie oben)

Alcianblau Methode nach *Steedmann* (*Pearse* [1961]).

Bei einem Teil der Embryonen wurden dazu noch ausgeführt:

Polysaccharidreaktion (wie oben)

Faserdarstellung nach *Gomori* (*Romeis* [1948] § 1533)

Morphologischer Kalknachweis nach *Kossa* (*Romeis* [1948] § 1637)

Morphologischer Kalknachweis nach *Krutsay* (*Krutsay* [1963])

Mit der MP-, PAS-, Polysaccharid- und Alcianblau-Reaktion bezweckten wir eine Darstellung des Knorpelgewebes und der Unterschiede in seiner Reife sowie der nach Lokalisation verschiedenen Aktivität des Perichondriums. Bei der MP-Reaktion interessierte uns überdies die Pyroninophilie des Cytoplasmas bei Knorpel und Perichondrium in verschiedener Lokalisation.

Mit der Silberimprägnation nach *Gomori* beabsichtigten wir das Auftreten von argyrophilen Fasern im Perichondriumblastem vor Ossifikationsbeginn zu verfolgen.

Die Kalknachweis-Methoden nach *Kossa* und *Krutsay* dienten uns zur Feststellung des erstmaligen Auftretens einer Verkalkung im Knorpel und zur zeitlichen Einordnung der Knorpelverkalkung beim Ablauf der Ossifikationsvorgänge im Perichondriumblastem. Die Methode nach *Krutsay* unterscheidet sich von der nach *Kossa* dadurch, daß die Reduktion des Silberphosphates zu metallischem Silber auf chemischem Wege (mit Na_2CO_3 -Formalin) anstatt auf physikalischem (unter Lichteinwirkung) vor sich geht.

Detaillierte Angaben über die zur Untersuchung ausgewählten Embryonen finden sich auf Tabelle II, die der Beschreibung der Befunde vorangestellt ist.

Befunde

Bei der Untersuchung unseres Materials haben wir festgestellt, daß der Reifegrad der Scapula nur in weiten Grenzen der SSL parallel geht, was gegen eine Einteilung nach der SSL spricht (vgl. *Streeter* [1951]). Wegen der großen individuellen Variabilität einzelner Scapulateile halten wir eine *Einteilung nach der Zone größter Knorpelreife*, die sich bei allen Entwicklungsstufen in der Spinafeilerwurzel befindet, für am ehesten brauchbar.

Das bei unseren Embryonen im Reifezentrum der Scapula beobachtete Knorpelstadium hat eine Einteilung in fünf Gruppen A–E ergeben (s. Tabelle II). Die Reihenfolge innerhalb der einzelnen Grup-

Tabelle 11. Verzeichnis der untersuchten Embryonen (Gruppeneinteilung nach dem Reifezentrum in der Scapula)

Zeichen	SSL (in mm)	Schnitt- richtung	Institutsbezeichnung	Färbung resp. Methode	Reife- zentrum	Schnitt- dicke	Bemerkungen
	8	quer	M. J. Sp. 17.5.51	Azan		6 μ	
A 1	9	quer	Egli 13.1.1951	Azan	Blastem	6 μ	
A 2	10	frontal	F. Sp. 15.9.1953	Azan	Blastem	6 μ	Blaufärbung flau
B 1	13	quer	Riechen 1948	Azan	I	6 μ	kontrastarm
B 2	11	quer	M. J. Sp. 8.6.1954	Azan	I	6 μ	starke Nackenbeuge
B 3	15	quer	M. J. Sp. 8.11.1940	Azan	I	6 μ	
B 4	15	frontal	M. J. Sp. 25.11.1954	Azan	I	6 μ	
B 5	16	frontal	Basel 15.12.1944	Azan	I	6 μ	
B 6	18	frontal	M. J. Sp. 7.7.1952	Azan	I	6 μ	
B 7	18	frontal	E 254	Azan/MP/PAS	I	8 μ	
B 8	17	quer	M. J. Sp. 2.10.1948	Azan	I	6 μ	
B 9	21	frontal	Vogelsperger 1963	MP/Glykogen	I	7 μ	
B 10	20	frontal	M. J. Sp. 17.11.1948	Azan	I	6 μ	
B 11	13	frontal	Riechen 18.6.1938	Azan	I	6 μ	starke Nackenbeuge
C 1	18	quer	Handschin 26.6.1942	Azan	III	6 μ	
C 2a	22	quer	1123a	Azan/MP/PAS/Glyk./Alc./Gomori	III	7 μ	a und b: je eine
C 2b	22	frontal	1123b	Azan/MP/PAS/Glyk./Alc./Gomori	III	7 μ	Scapula desselben Embryos
C 3	20	quer	Sellheim 17.1.1945	Azan	III	8 μ	Zwillinge A und B
C 4	20	quer	Braunschweig 8.4.1944	Azan	III	6 μ	
C 5	19	quer	E 212	Azan/MP/PAS/Alcianblau	III	8 μ	
C 6	21	quer	Embryo 1948	Azan	III	6 μ	
C 7	21	quer	Vogelthaler	MP/Glykogen	III	7 μ	

Tabelle II. (Fortsetzung)

C 8	22	quer	M. J. Sp. 28.1.1944	Azan	III	6 μ	
C 9	23	quer	Egli 22.1.1948	Azan	III	6 μ	
C 10	21	frontal	Buser 28.2.1943	Azan	III	6 μ	
C 11	22	frontal	M. J. Sp. 9.11.1946	Azan	III	6 μ	
C 12	23	frontal	E 204	Azan/MP/PAS/Glykogen	III	7 μ	
D 1	24	quer	Egli 13.3.1953	Azan	IV	6 μ	
D 2	25	frontal	M. J. Sp. 15.2.1951	Azan	IV	6 μ	
D 3	25	frontal	E 205	Azan/MP/PAS/Glykogen	IV	7 μ	
D 4	26	frontal	Vogelbaum	MP/Glykogen	IV	7 μ	
E 1	25	quer	Riechen 2.4.1937	Azan	V	8 μ	Nackenbeuge gering
E 2	29	quer	Gengenbach 22.9.1948	Azan	V	7 μ	
E 3	27	frontal	M. J. Sp. 10.10.1951	Azan	V	6 μ	
E 4	28	frontal	Egli 15.5.1950	Azan	V	7 μ	
E 5	32	quer	1126	Azan/MP/PAS/Glyk./Alc./Go./Kr.	V	8 μ	Kr. = Krutsay
E 6	28	quer	Riechen 28.3.1948	Azan	V	7 μ	
E 7	34	quer	Embryo 9.11.1949	Azan	V	8 μ	
E 8	31	quer	Egli 6.6.1950	Azan	V	7 μ	
E 9	30	quer	Embryo Mensch	Azan	V	7 μ	
E 10	31	frontal	E 215	Azan/MP/PAS/Alc./Go./Kossa	V	8 μ	
E 11	31	frontal	Vogelwald	MP/Glykogen	V	7 μ	
	35	frontal	E 220	Azan/MP/PAS/Alc./Go./Kossa	V	8 μ	Stadium V verkalkt

pen haben wir nach der Ausdehnung des reifsten Knorpelstadiums und nach dem Entwicklungszustand des Perichondriums festgelegt.

Gruppe A: Reifezentrum blastematös

Während die Scapulaanlage bei unserem 8-mm-Embryo nicht zu erkennen ist, fanden wir sie erstmals beim *Embryo A1* vor. Sie ist blastematös. In dem costo-axillär am besten begrenzten Blastem sind nur eine große Supraspinalplatte, eine viel kleinere Infraspinalplatte und eine Spinapfeilerwurzel zu erkennen. Die Abgrenzung eines Processus coracoides ist fraglich, die einer Collumregion unmöglich. Das Umgebungsgewebe des Blastems zeigt costo-axillär die beste Ordnung seiner Zellkerne (Abb. 3).

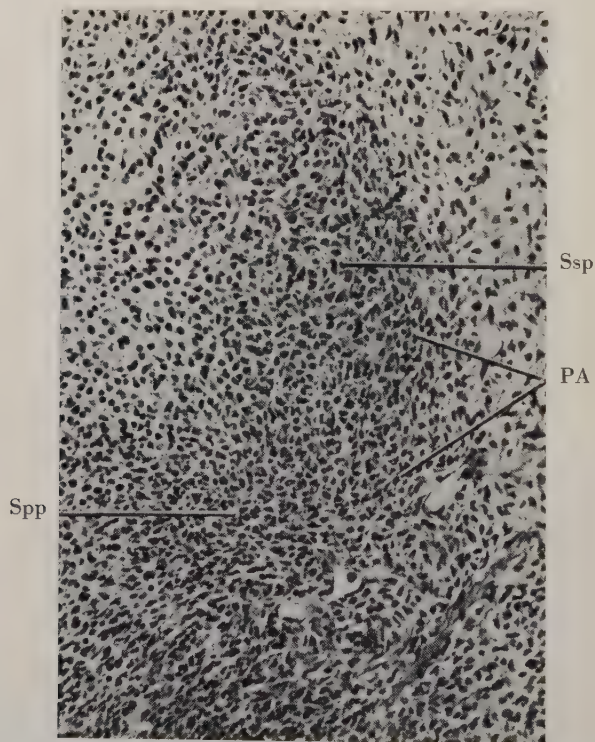


Abb. 3. Embryo A1, 9 mm SSL, quer, 6 μ , Azan, Schnitt 16/4/4, Vergr. 200 $\times$. Axillär unten und kostal rechts im Bild. Blastematöse Anlage der Supraspinalplatte (Ssp) und des basalen Teils des Spinapfeilers (Spp) an deren kutan-axillärer Kante. Durch die Ordnung der Kernlängsachsen wird im Umgebungsgewebe, vor allem auf der Kostalseite der Supraspinalplatte gegen axillär, eine Anlage des Perichondriums (PA) angedeutet.

Kranial von der Spinapfeilerwurzel besteht die Scapula aus einer sagittal eingestellten blastematischen Platte, die allseitig nur schlecht gegen die Umgebung abgegrenzt ist, am besten auf ihrer Kostalfläche und an ihrem axillären Rand. Weiter kaudal, etwas kranial von der Stelle, wo der N. suprascapularis die Scapulaplatte überquert, ist an ihrer kutan-axillären Kante die blastematische Anlage der Spinapfeilerwurzel erkennbar. Auf Schnitten etwas kaudal vom N. suprascapularis wird die Scapulaplatte rasch kleiner und ist im scapulo-humeralen Blastem nicht mehr zu unterscheiden. Am nachmaligen Ort des Processus coracoides, kostal vom Humerusblastem, wird durch die Kernanordnung ein auf Schnitt rundliches Blastem angedeutet, das aber nicht sicher als Anlage des Processus coracoides zu identifizieren ist.

Der *Embryo A2* ist wegen seiner flauen Blaufärbung für unsere Untersuchung schlecht geeignet. Die ganze Scapulaanlage ist blastematisch. Nur eine große Supraspinalplatte und die Collumregion sind abgrenzbar. Die Infraspinalplatte fehlt vollständig. Der Processus coracoides ist auch hier nicht sicher vorhanden.

Gruppe B: Reifezentrum in Stadium I

Der *Embryo B1* ist sehr kontrastarm; soweit zu erkennen, zeigt er die gleichen Verhältnisse wie der folgende in einem etwas jüngeren Stadium.

Beim *Embryo B2* ist die Scapulaplatte gegenüber dem Spinapfeiler mit Acromion und dem Processus coracoides ausgesprochen klein, vor allem ist die Infraspinalplatte schmal und kurz. Die Supraspinalplatte besteht aus vier Anteilen (Abb.4). Der reifste Knorpel – im vollausgebildeten Stadium I – findet sich in der Spinapfeilerwurzel. Um diese gruppieren sich konzentrische Knorpelzonen gleicher Reife, wobei die Reife der einzelnen Zonen zentrifugal abnimmt (Abb.5). Diese Knorpelreifeverteilung trifft für drei Anteile der Supraspinalplatte und für den Processus coracoides nicht zu. Die Reife des Perichondriums geht der des überzogenen Knorpels parallel, sie ist jedoch auf der Kostalseite allgemein größer als kutan.

Die Höhe der Supraspinalplatte verhält sich zu derjenigen der Infraspinalplatte wie 1:2. Die Supraspinalplatte besteht aus einem vertebralen, einem größeren, gegenüber den benachbarten nach kostal verschobenen intermediären und einem axillären Anteil, an dessen costo-axillärer Ecke ein vierter, sehr kleiner costo-axillärer Anteil aufsitzt (Abb.4).

Der axilläre Anteil ist in den kranialsten Schnitten noch nicht vorhanden, gewinnt jedoch gegen kaudal rasch an Größe und bildet dort den Hauptteil der Supraspinalplatte. Im kaudalen Bereich der Supraspinalplatte sind nur noch der stark entwickelte, knorpelige axilläre und – ihm angelagert – der kleine, blastematische vertebrale Anteil vorhanden.

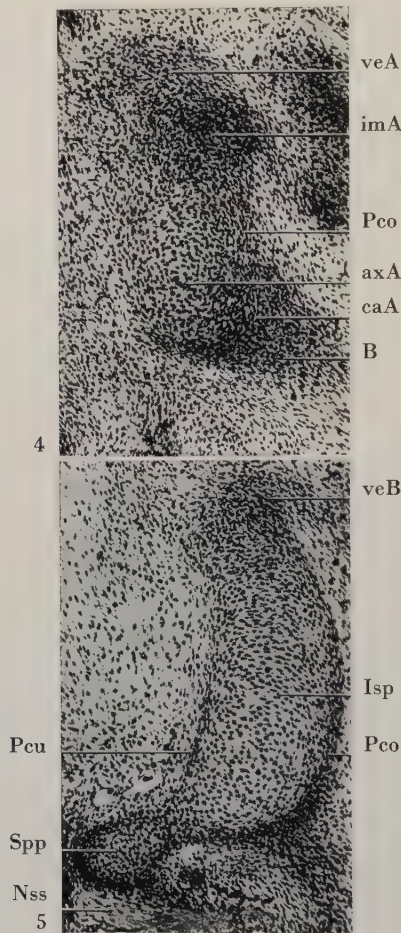


Abb. 4. Embryo B2, 11 mm SSL, quer, 6μ , Azan, Schnitt 40/3/1, Vergr. $90\times$. Schnitt durch den kranialen Teil der Supraspinalplatte. Von vertebral nach axillär sind der kleine vertebrale (veA), der rundliche intermediäre (imA) und der große axilläre Anteil (axA) zu sehen. Dem kosto-axillären Ende des axillären Anteils ist der sehr kleine, blastematöse kosto-axilläre Anteil (caA) aufgepfropft, von dem aus ein bandartiges Blastem (B) wegzieht. Beachte das dicke Perichondrium costale (Pco).

Abb. 5. Gleicher Embryo wie Abb. 4, Schnitt 41/3/2, Vergr. $90\times$. Schnitt durch den kranialsten Teil der Infraspinousplatte (Isp) auf der Höhe, wo sich der Spinapfeiler in seinem kranio-kutanen Verlauf von der Scapulaplatte zu trennen beginnt. Axillär vom Spinapfeiler verläuft der N. suprascapularis (Nss). Man beachte die Reifeverteilung im Knorpel (s. Text S. 71), die kosto-kutanen und vertebro-axillären Unterschiede in der Ausbildung des Perichondriums (Pco, Pcu) sowie dessen Übergang ins vertebrale Randblastem (veB) (s. Text S. 75).

Axillär vom knorpelig vorgebildeten Teil der Supraspinalplatte erstreckt sich zum noch wenig massiven Collum hin eine Senke, durch die der N. suprascapularis zieht, und die später mit Ausnahme der Incisura scapulae durch Knochengewebe aufgefüllt wird.

Die kleine, dicke Infraspinalplatte ist kranial in der Horizontalebene kostal-konvex gekrümmt und läuft nach kaudal sich verjüngend aus. Sie scheint wie aufgesetzt auf der kostalen Hälfte der Collumregion, so daß auf der Kostalseite eine kranio-kaudal verlaufende Rinne zwischen den beiden Teilen entsteht.

Von der Spina ist nur der knorpelig vorgebildete Spinapfeiler vorhanden (Abb. 5). An seinem axillären Ende ist das blastematöse Acromion zu erkennen. Die dünne Platte des Acromions geht am Ort des Acromio-claviculargelenkes kontinuierlich in die teils knorpelige, teils blastematöse Anlage der Clavicula über.

Der große Processus coracoides biegt von der Kostalfläche der Collumregion nach kostal ab und ist stark kaudalwärts gekrümmt (Abb. 6).

Während der reifste Teil der Scapula im vollausgebildeten Stadium I ist, sind größere Randgebiete noch blastematös. Der vertebrale Anteil der Supraspinalplatte, der kaudal anschließende Teil des Margo vertebralis samt dem Angulus caudalis und das Acromion bestehen ganz aus ungeordneten Blastemzellen. Der intermediäre Anteil, der sich nicht weit kaudalwärts ausdehnt, ist ebenfalls rein blastematös, aber seine Zellkerne zeigen eine zwiebelschalenartige konzentrische Reihenanordnung (Abb. 4). Der axilläre Anteil ist knorpelig; in ihm folgen von vertebral nach axillär die Knorpelstadien A, B und – in der Region der Spinapfeilerwurzel – Stadium I aufeinander (vgl. Abb. 4). In der Infraspinalplatte findet sich die oben beschriebene Verteilung der Knorpelreife. Vom Blastemstreifen an der Stelle des Gelenkspaltes ausgehend nimmt die Knorpelreife in der Collumregion gegen die Spinapfeilerwurzel hin kontinuierlich zu, wobei die Zonen gleicher Knorpelreife hier schmaler sind als im vertebralwärts anschließenden Teil der Scapulaplatte. Eine gleichmäßige Reifezunahme findet sich auch vom blastematösen Acromion über den Spinapfeiler bis zu dessen Wurzel im Stadium I.

Der Processus coracoides befindet sich größtenteils im Stadium B. Er wird von der Collumregion durch eine keilförmige Interposition von jüngerem Gewebe abgegrenzt, deren blastematöse Basis der kutanen Fläche anliegt und deren Spitze bis nach kostal reicht (Abb. 6).

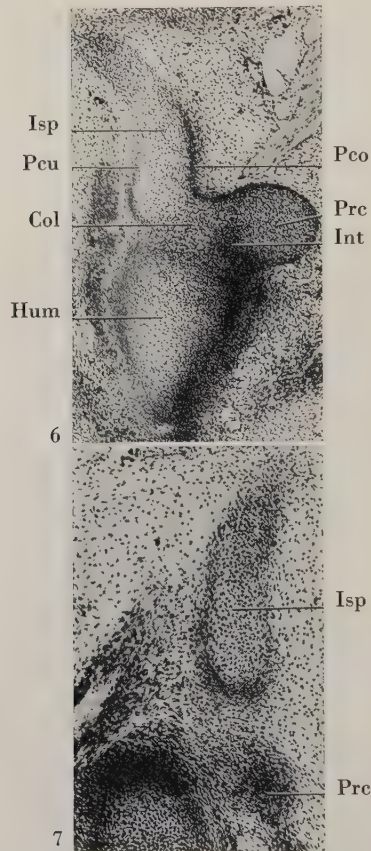


Abb. 6. Gleicher Embryo wie Abb. 4, Schnitt 42/5/1, Vergr. 45 $\times$. Schnitt durch die Infraspinaleplatte (Isp), die Collumregion (Col), den Processus coracoides (Pco) und den proximalen Teil des Humerus (Hum). Man beachte die Größenverhältnisse zwischen den abgebildeten Teilen, die Lage des Processus coracoides, die keilförmige Interposition (Int) jüngerer Zellen zwischen ihm und der Collumregion (s. Text S. 73) und die nach der Lokalisation verschiedene Ausbildung des Perichondriums (Pco, Pcu) (s. Text S. 74, 75).

Abb. 7. Gleicher Embryo wie Abb. 4, Schnitt 44/4/1, Vergr. 70 $\times$. Schnitt durch die kleine Infraspinaleplatte (Isp) auf mittlerer Höhe. Axillär von der Infraspinaleplatte ist die kaudalwärts gerichtete blastematische Spitze des Processus coracoides (Prec) zu sehen.

Der Perichondriumüberzug ist einschichtig. Seine Ausbildung zeigt je nach Lokalisation große Unterschiede, die vor allem seine Dicke, sowie die Form, Anzahl, Größe und Längsachseneinstellung der Perichondriumzellkerne betreffen. Die Abgrenzbarkeit des Perichondriums bei Azanfärbung wird wesentlich durch die letztgenann-

ten Faktoren bestimmt. Das kostale Perichondrium ist über der ganzen Scapulaplatte besser abgrenzbar als das kutane. Beidseits wird das Perichondrium mit zunehmendem Abstand von der Spinapfeilerwurzel undeutlicher (Abb. 4–7). Auf Querschnitten durch die Scapulaplatte ist auf der Kostalseite über allen Knorpelstadien ein Perichondrium vorhanden, während es auf der Kutanseite über dem kranialsten Teil des axillären Supraspinalplattenanteils und über dem kaudalsten Teil der Infraspinalplatte fehlt (Abb. 4 und 7). In Höhe der Spinapfeilerwurzel ist das Perichondrium beidseits am besten ausgebildet.

Das Perichondrium costale besteht hier aus ungefähr acht Reihen von dichtgepackten Zellen mit ausschließlich spindelförmigen Kernen, deren Längsachsen parallel gerichtet sind. Mit zunehmendem Abstand von der Spinapfeilerwurzel nehmen Reihenzahl und Kerndichte ab, die Kerne sind kleiner, teilweise ovoid, und ihre Längsachsen sind nicht überall parallel gerichtet. Schließlich geht das zunehmend undeutlicher abgrenzbare Perichondrium ins randständige Blastem über (Abb. 5 und 6). Das kutane Perichondrium besteht über der Spinapfeilerwurzel aus ungefähr vier Reihen von weniger dicht gepackten Perichondriumzellen mit nur teilweise spindelförmigen Zellkernen, deren Längsachsen nur zum großen Teil parallel gerichtet sind. Mit zunehmendem Abstand von der Spinapfeilerwurzel sind die gleichen Veränderungen wie auf der Kostalseite zu sehen, nur daß hier die Kerne größtenteils spindelförmig bleiben (Abb. 5 und 6).

Collum, Processus coracoides und Spinapfeiler zeigen ein gut ausgebildetes Perichondrium.

Der *Embryo B3* ist kaum weiterentwickelt und viel kontrastärmer als der vorhergehende, gegenüber dem die Größenzunahme der Infraspinalplatte etwas stärker ist als die der Supraspinalplatte.

Am Margo vertebralis ragt im kranialen Teil der Infraspinalplatte eine blastematöse Leiste nach kostal, die eine direkte Fortsetzung des vertebralen Supraspinalplattenanteils darstellt und kaudalwärts allmählich verschwindet.

Die übrigen Befunde unterscheiden sich nicht von denen beim *Embryo B2*.

Beim *Embryo B4* zeigen die formalen Befunde keine prinzipiellen Unterschiede zum *Embryo B11*.

Der reifste Knorpel ist im vollausgebildeten Stadium I, dessen Ausdehnungszone um die Spinapfeilerwurzel gegenüber dem *Embryo B2* nach allen Richtungen vorgerückt ist, aber nirgends unmittelbar an das Perichondrium costale reicht. Auch die konzentrischen Knorpelzonen gleicher Reife haben sich vergrößert. In der Supraspinalplatte ist der noch blastematöse vertebrale Anteil nicht sicher zu erkennen. Der intermediäre Anteil ist ausgesprochen groß. Er besteht aus zentralen ungeordneten Blastemzellen mit rundlichen Kernen, die von zwiebelschalenartig angeordneten Zellen mit eher spin-

delförmigen Kernen umgeben sind. Diesem annähernd kugelförmigen Gebilde sitzen kranial mehrere Reihen weniger dicht beieinanderliegender Zellen kappenartig auf. Kaudalwärts besteht eine deutliche Grenze gegen den darunterliegenden Knorpel im Stadium A; sie liegt im nach kostal offenen stumpfen Winkel zwischen Supra- und Infraspinalplatte. Der intermediäre Anteil macht hier also die ganze Höhe der Supraspinalplatte aus, was beim axillären und costo-axillären Anteil nicht zutrifft. Der axilläre Anteil, der schon beim Embryo B2 knorpelig ist, erweist sich auf Frontalschnitten als kranialster Teil einer einheitlichen Knorpelplatte, die kaudal von der Spinawurzel zur Infraspinalplatte wird. Weit gegen axillär hin sitzt diesem knorpeligen Anteil der hier stark entwickelte blastematöse costo-axilläre Anteil auf, der beim Embryo B2 nur sehr klein ist. Er baut bei unserem Embryo die halbe Höhe der Supraspinalplatte auf. Von ihm aus ragt ein rundlicher Sporn axillärwärts vor.

Im Processus coracoides und im Spinapfeiler ist die Knorpelreife etwas weiter fortgeschritten als beim Embryo B2.

Die Perichondriumverhältnisse entsprechen denen beim Embryo B2. Besser als auf Querschnitten läßt sich hier die zukünftige Spinaregion beurteilen. Entlang der abgerundeten kutanen Kante der axillären Infraspinalplattenhälfte zieht kaudal von der supraspinalen Portion des M. trapezius ein axillärwärts größer werdendes Blastem aus polymorphkernigen, weit auseinanderliegenden, kleinen Zellen, die sich gegen den Spinapfeiler hin verdichten. Es stellt die Spinanlage dar, soweit sie nicht vom Spinapfeiler gebildet wird. Auf Höhe der kranio-kutanen Infraspinalplattenkante, die der Spinawurzel entspricht, vereinigen sich die Zellen des kutanen Perichondriums mit dem vertebralen Ende des Spinablastems. Dabei beginnen die über der Infraspinalplatte parallel gerichteten Längsachsen der Perichondriumzellkerne nach kranial zu divergieren und sich tangential

Abb. 8. Embryo B7, 18 mm SSL, frontal, 8 μ , PAS-Reaktion, Schnitt 4c/1/4, Vergr. 65 $\times$. Schnitt durch Supra- und Infraspinalplatte, die auf der Kutanseite stumpfwinklig aufeinandertreffen. Kaudal von der supraspinalen Portion des M. trapezius (Mtr) liegt das Spinablastem (SpB). Beachte die Häufung PAS-positiver Granula in der kostalen Hälfte der Supraspinalplatte (Ssp) und im kostalen Perichondrium (Pco).

Abb. 9. Gleicher Embryo wie Abb. 8, MP-Reaktion, Schnitt 4d/3/1, Vergr. 65 $\times$. Schnitt durch die Scapulaplate unmittelbar vertebral vom Spinapfeiler. Beachte die Unterschiede der Färbbarkeit in kranio-kaudaler und kosto-kutaner Ausdehnung, sowohl im Perichondrium (Pco, Pcu) wie auch in der Knorpelinterzellularsubstanz (s. Text S. 78).

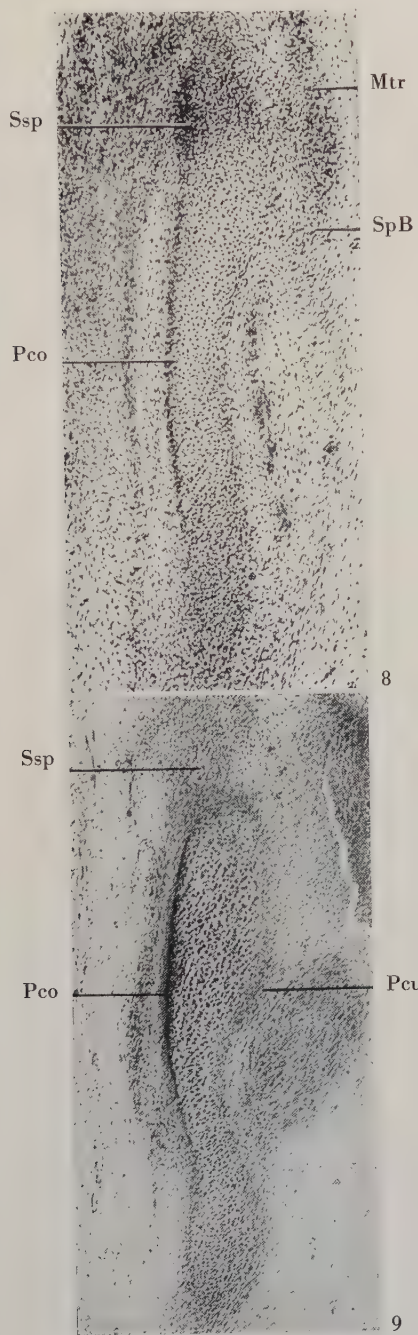


Abb. 8 und 9

zur Rundung der Spinawurzel einzustellen, wodurch auf Frontalschnitten ein kutanwärts vorspringender Zipfel im Perichondriumblastem abgegrenzt wird, während die Kernlängsachsen des kutan anschließenden Spinablastems keine Ordnung erkennen lassen. Axillärwärts verschwindet der Zipfel; hier werden alle Längsachsen der Zellkerne ungeordnet. Das axilläre Ende des Spinablastems geht kontinuierlich in das Perichondrium des Spinapfeilers über.

Die Verhältnisse beim *Embryo B5* entsprechen denen beim vorhergehenden.

Der *Embryo B6* zeigt sehr ähnliche Befunde wie der *Embryo B4*. Der Spinapfeiler ist auffallend groß und an seinem kranialen Ende stark aufgetrieben. Von dieser Auftreibung ragt ein Knorpelsporn vertebralwärts ins Spinablastem, dessen Länge der Dicke des Spinapfeilers gleichkommt.

Beim *Embryo B7* zeigen die Azan-Präparate keine Besonderheiten gegenüber dem *Embryo B4*.

PAS-Reaktion (vgl. Abb.8): Die Interzellulärsubstanz und das Cytoplasma der Knorpelzellen reagieren mit zunehmender Reife stärker PAS-positiv, am stärksten in der Spinapfeilerwurzel. In der kostalen Hälfte der Supraspinalplatte, deren Knorpel sich im Stadium A befindet, sind PAS-positive Granula im Zwischenkernraum angereichert. In der Infraspinalplatte ist weit vertebro-kaudal ein Knorpelbezirk in Stadium A vorhanden, der subperichondral-kostal ebenfalls eine Häufung von PAS-positiven Granula zeigt; dies trifft an Stellen, wo reiferer Knorpel vorhanden ist, nirgends zu. Dieselbe Einlagerung findet sich auch im Spinapfeiler und im Processus coracoides.

Das gesamte Perichondrium kostale enthält gehäuft PAS-positive Granula, was auf der Kutanseite nicht der Fall ist.

MP-Reaktion (vgl. Abb.9): Die Blastem- und die Knorpelzellen (Stadium A bis I) haben ein rotgranuliertes Cytoplasma, wobei der Reichtum an Granula mit zunehmender Reife größer wird. Die Färbbarkeit der Interzellulärsubstanz nimmt mit der Reife des Knorpels zu; sie ist in der Spinapfeilerwurzel am größten.

Das ganze Perichondrium costale erscheint als breites rotes Band mit eingelagerten, dichtgedrängten Perichondriumzellkernen, wobei die Intensität der Rotfärbung der Reife des überzogenen Knorpels parallel geht. Bei stärkerer Vergrößerung sind im Cytoplasma der Perichondriumzellen rote Granula auf der Kostal- und – in geringerem Maße – auch auf der Kutanseite zu sehen.

Die Verhältnisse beim *Embryo B8* liegen zwischen denen bei den Embryonen B3 und C1.

Beim *Embryo B9* stimmen die Befunde bei den Schnitten mit MP-Reaktion mit denen beim Embryo B7 überein.

Glykogen-Färbung: Auf der Kostalseite sind im Zwischenkernraum von Stadium A bis I (früh) Glykogen-positive Granula eingelagert, vor allem im kranio-kostalen Bereich des axillären Suprascapularplattenanteiles (Abb. 10 und 11).

Im kostalen Perichondrium sind im Cytoplasma mit zunehmender Reife des bedeckten Knorpels mehr Glykogen-positive Granula vorhanden; sie fehlen im Perichondrium über Knorpel im Stadium A (Abb. 10 und 12).

Die Verhältnisse beim *Embryo B10* decken sich weitgehend mit denen beim folgenden.

Beim *Embryo B11* ist die Scapulaplatte im Verhältnis zu Processus coracoides und Acromion nur wenig größer als beim Embryo B4. Die größten Höhen von Supra- und Infrascapularplatte verhalten

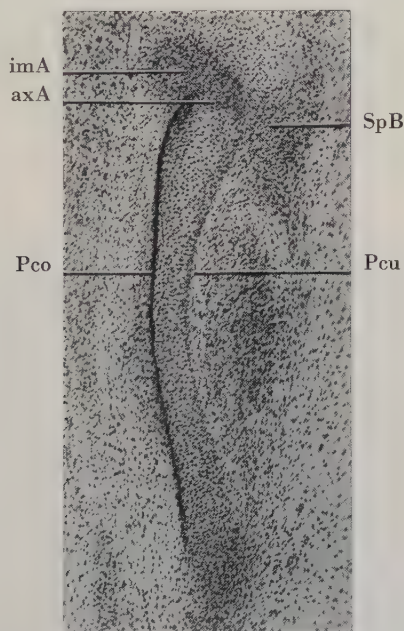


Abb. 10. Embryo B9, 21 mm SSL, frontal, 7 μ , Glykogen, Schnitt 165/5, Vergr. 50 $\times$. Schnitt durch die Scapulaplatte. Kutan von der Spinawurzel ist das Spinablastem (SpB) zu sehen. Beachte die massive Einlagerung Glykogen-positiver Granula im axillären Suprascapularplattenanteil (axA) an der kranio-kostalen Grenzzone zum intermediären Anteil (imA) und im kostalen Perichondrium sowie deren Fehlen im Perichondrium cutaneum (Pcu) und über Knorpel im Stadium A.

sich wie 1:3. Die Supraspinalplatte ist in der Nähe des Margo vertebralis hoch, wird axillärwärts niedriger bis sie auf weniger als die Hälfte reduziert ist, steigt am Beginn ihres axillären Drittels auf

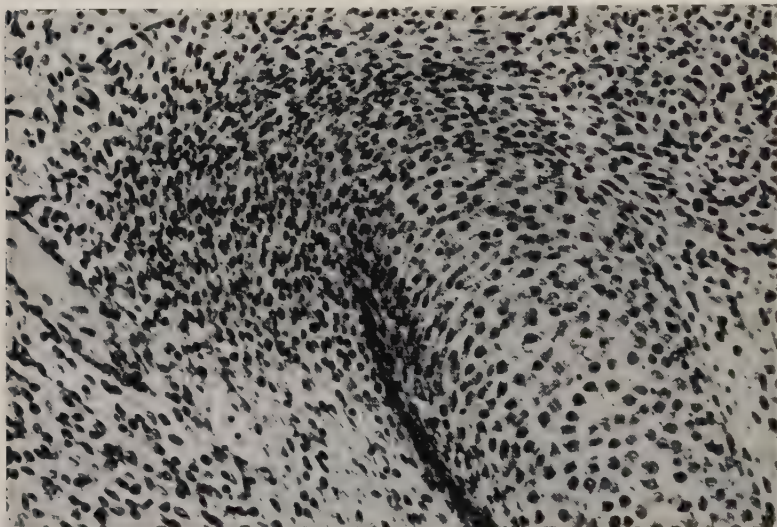


Abb. 11. Ausschnitt aus Abb. 10, Vergr. 200 $\times$. Beachte die Einlagerung Glykogen positiver Granula im Zwischenkernraum des kranio-kostalen Gebietes des axillären Anteils.



Abb. 12. Ausschnitt aus Abb. 10, Vergr. 255 $\times$. Kaudaler Bereich der Infraspinalplatte. Beachte die Einlagerung Glykogen-positiver Granula auf der Kostalseite im Perichondrium und im Zwischenkernraum des Knorpels sowie ihr völliges Fehlen im kutanen Perichondrium.

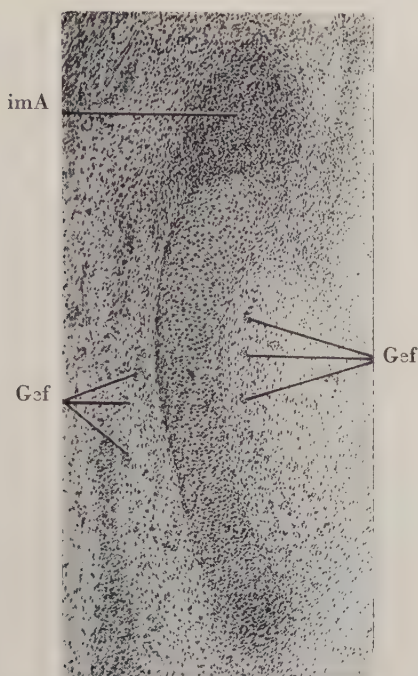


Abb. 13. Embryo B11, 13 mm SSL, frontal, 6 μ , Azan, Schnitt 30/1/1, Vergr. 50 $\times$. Schnitt durch die Scapulaplatte. Beachte die kostal-konvexe Krümmung der Infraspinalplatte. Um das Perichondrium finden sich Gefäße, darin jedoch nicht (Gef). Ganz kranial im intermediären Suprascapularplattenanteil (imA) ist der Knorpel reifer als im Zwischengebiet bis zur Infraspinalplatte.

eine maximale Höhe an und fällt dann steil ab gegen die tiefe Senke in der Incisuraregion. Durch einen axillärwärts gerichteten Knorpelsporn, den wir schon beim Embryo B4 angetroffen haben, entsteht sogar ein Überhang. Die Suprascapularplatte liegt nur ganz vertebral in der Ebene der Infraspinalplatte, weiter axillär bildet sie mit ihr einen nach kostal offenen stumpfen Winkel. Die Infraspinalplatte ist in der Frontalebene deutlich kostal-konvex gekrümmt (Abb. 13). Sie ist zentral am dünnsten, ganz kranial auf die doppelte Dicke und kaudal etwas weniger aufgetrieben.

Der Processus coracoides ist nicht so stark gewachsen wie die Infraspinalplatte. Er geht von der Kostalfläche der Collumregion annähernd lotrecht nach kostal ab und verläuft im Bogen nach axillär und nur wenig nach kaudal.

Fast die ganze Scapula ist knorpelig, nur kleine Gebiete sind blastematös, wenn man von der Spinaanlage und der Incisuraregion

absieht. Der reifste Knorpel – in der Spinapfeilerwurzel – zeigt das vollausgebildete Stadium I. Die vier Anteile der Supraspinalplatte sind nur gegen kaudal gut abgrenzbar. Der vertebrale Anteil besteht aus einem bis zur Kutanfläche reichenden blastematösen Keil mit einer kostal liegenden Basis und einem kappenartigen Aufsatz aus Knorpel im Stadium A (Abb. 14). Im Unterschied zum vertebrealen sitzt der intermediäre Anteil (Abb. 15 und 16) dem kranialen Ende der Infraspinalplatte nach kostal verschoben auf, wodurch die oben erwähnte Abwinkelung der Supraspinalplatte entsteht. Er gleicht der Form eines Zuckerstockes, dessen Spitze axillärwärts schaut. An seinem vertebrealen Ende ist er allein am Aufbau der Supraspinalplatte beteiligt, dagegen bildet er axillärwärts nur ihren kranialsten Abschnitt, während der darunterliegende axilläre Anteil den Rest aufbaut. Seine Knorpelzellreife nimmt, umgekehrt wie in der darunterliegenden Infraspinalplatte (resp. im axillären Anteil), axillärwärts ab. Die zwiebelschalenartige Kernanordnung, die bei jüngeren Embryonen ausgeprägt ist, besteht nur noch andeutungsweise. Der axilläre Anteil (Abb. 16 und 17), der gegen kaudal kontinuierlich in die Infraspinalplatte übergeht, schließt axillär an den vertebrealen an. Er gewinnt axillärwärts an Höhe und unterlagert dabei, wie oben angegeben, das axilläre Ende des intermediären und den ganzen kosto-axillären Anteil. Unmittelbar vor der Incisuraregion reduziert sich seine Dicke auf ungefähr ein Drittel; er macht hier die Hälfte der Supraspinalplattenhöhe aus. Er besteht hauptsächlich aus Knorpel im Stadium B, nur ein kleiner Bezirk in der Nähe der Spinapfeilerwurzel ist im Stadium I. Sein nach axillär gerichteter spornartiger Fortsatz ist blastematös (Abb. 18). Der auf dem axillären sitzende kosto-axilläre Anteil (Abb. 17) schließt axillär an den intermediären an. Seine vertebro-axilläre Ausdehnung ist gering. Er ist teils blastematös, teils befindet er sich im Stadium A.

Abb. 14. Gleicher Embryo wie Abb. 13, Schnitt 29/2/1, Vergr. 85×. Schnitt durch den vertebrealen Supraspinalplattenanteil (veA) und durch den kranialen Teil der Infraspinalplatte (s. Text).

Abb. 15. Gleicher Embryo wie Abb. 13, Schnitt 34/2/1, Vergr. 85×. Schnitt durch das vertebrale Ende des intermediären Supraspinalplattenanteils (imA) und durch den kranialen Teil der Infraspinalplatte. Kranial von der Spinawurzel (Spw) ist nur der intermediäre Anteil vorhanden, der somit die ganze Höhe der Supraspinalplatte ausmacht. Kutan an die Spinawurzel schließt das Spinablastem an.

Abb. 16. Gleicher Embryo wie Abb. 13, Schnitt 36/4/1, Vergr. 85×. Schnitt durch das axilläre Ende des intermediären Anteils (imA), das durch den axillären Anteil (axA) unterlagert wird. Beachte das Spinablastem (SpB).

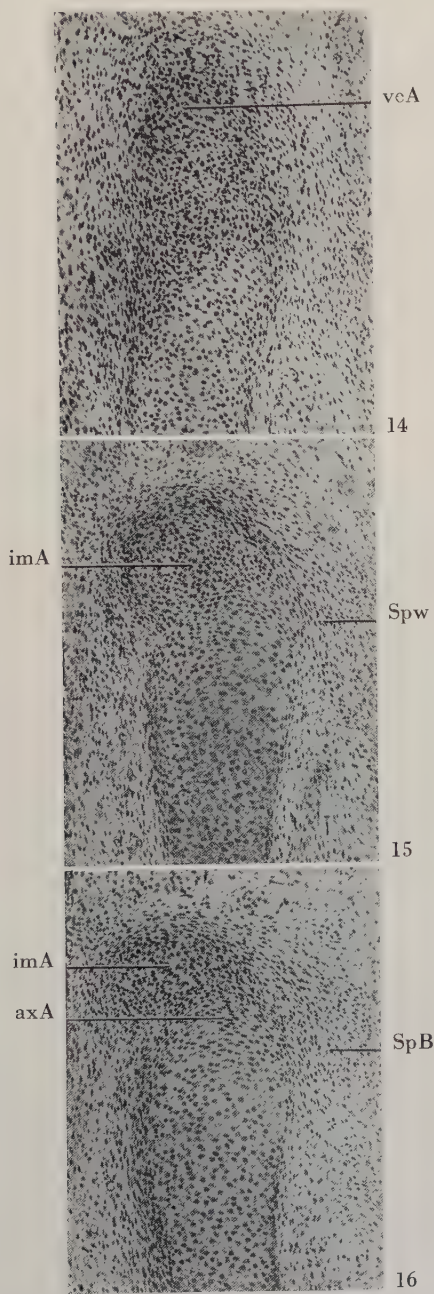


Abb. 14-16

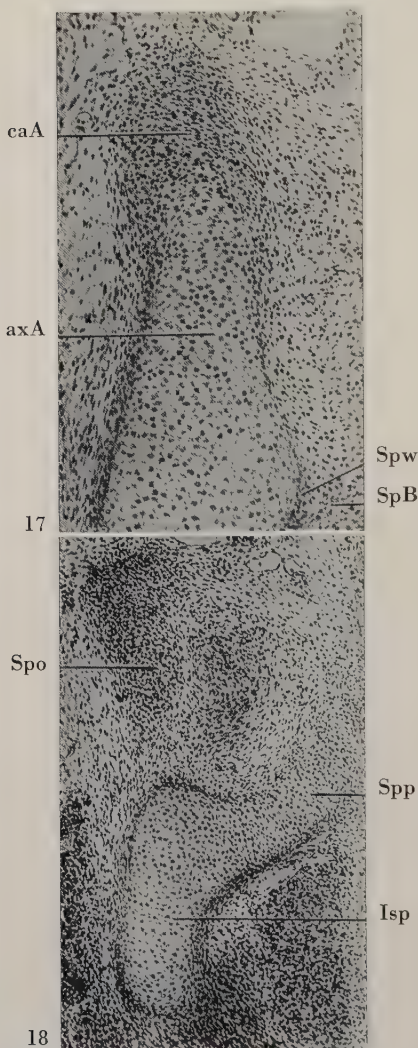


Abb. 17. Gleicher Embryo wie Abb. 13, Schnitt 40/2/1, Vergr. 85 $\times$. Schnitt durch den kosto-axillären (caA) und den hier großen axillären Supraspinalplattenanteil (axA). Unten im Bild ist die Spinawurzel (Spw) und kutan anschließend das Spinalblastem (SpB) zu sehen. Der hohe axilläre Anteil geht kaudalwärts kontinuierlich in die Infraspinalplatte über.

Abb. 18. Gleicher Embryo wie Abb. 13, Schnitt 41/3/2, Vergr. 55 $\times$. Schnitt durch den Spinafeiler (Spp) und die Infraspinalplatte (Isp). Beachte den axillärwärts gerichteten Sporn (Spo) des kosto-axillären Supraspinalplattenanteils kranio-kostal vom kranialen Rand der Infraspinalplatte.

Die Infraspinalplatte besteht zu einem großen Teil aus Knorpel im Stadium I. Der Reifezustand des Knorpels zeigt die beim Embryo B2 beschriebene Verteilung. Die Collumregion ist bis nahe an die spätere Facies glenoidalis im Stadium I.

Mit zunehmendem Abstand von seiner Wurzel finden sich im Spinapfeiler die Stadien I bis A. Das anschließende Acromion ist in der Grenzzone im Stadium A, apikal jedoch blastematös.

Der Processus coracoides ist mit Ausnahme der Coracoidwurzel und seiner Spitze, die beide aus jüngerem Gewebe bestehen, im Stadium I.

Das Perichondrium ist wie bei jüngeren Embryonen auf der Kostalfläche besser ausgebildet als auf der Kutanseite. Es ist auf der Spinawurzel noch dicker als beim Embryo B2, zeigt aber sonst die gleichen Verhältnisse.

Im Bereich des Spinablastems bestehen keine Unterschiede zum Embryo B4.

Gruppe C: Reifezentrum in Stadium III

Der Embryo C1 weist gegenüber dem Embryo C5 keine Besonderheiten auf, ist jedoch etwas jünger.

Der Embryo C2a weicht in folgenden Befunden vom Embryo C5 ab: Die Höhe der Supraspinalplatte verhält sich zu derjenigen der Infraspinalplatte wie 1:4. Die Supraspinalplatte ist nur halb so breit wie das kraniale Ende der Infraspinalplatte. Diese zeigt an ihrem Margo vertebralis kranial eine mächtige wulstartige Auftreibung, die kaudalwärts kleiner wird. Sie ist kranial in ihrem axillären Drittel stark abgewinkelt.

In der Supraspinalplatte lassen sich nur drei Anteile unterscheiden. Anstelle von vertebralem und intermediärem Anteil ist eine «vertebrale» Gruppierung von Knorpelzellen im Stadium A vorhanden (vgl. Embryo C6), die sich kontinuierlich nach kaudal fortsetzt und den dicken, kaudalwärts sich verjüngenden Wulst am Margo vertebralis der Infraspinalplatte bildet. Diese weist die oben beschriebenen Zonen gleicher Knorpelreife um die Spinapfeilerwurzel als Zentrum im Stadium III auf. In mittlerer Höhe ist noch Knorpel in Stadium III vorhanden. Im Spinapfeiler sind alle Übergänge von Stadium B apikal bis Stadium III an der Spinapfeilerwurzel zu finden. Der mächtige Processus coracoides (Abb.19) und die Collumregion sind größtenteils im Stadium I; zwischen ihnen ist ein keilförmiger Knorpelbezirk im Stadium B interponiert.

Die PAS-Reaktion zeigt ähnliche Verhältnisse wie bei Embryo C5, jedoch fehlt eine subperichondrale Einlagerung PAS-positiver Granula im Zwischenkernraum der Stadien A und B auf der Kostalseite.

Glykogen-Färbung: Je reifer der Knorpel, desto stärker ist die Interzellulärsubstanz gefärbt (Stadium A bis III); eine Ausnahme machen Supraspinalplatte und Margo vertebralis, wo sich Knorpel

im Stadium A mit stark gefärbter Interzellulärsubstanz findet. Die Knorpelhöhlen enthalten, zum Teil im Cytoplasma der Knorpelzellen, Glykogen-positive Tropfen, die mit zunehmender Knorpelreife größer und zahlreicher sind. Diese sind zudem im Zwischenkernraum der Stadien A bis II auf der Kostalseite gehäuft, ähnlich wie beim Embryo B9, hier aber vor allem am Margo vertebralis und subperichondral in der kranialen Hälfte der Infraspinalplatte.

Das Perichondrium unterscheidet sich kaum von dem beim Embryo B9.

Die *MP*- und die *Alcianblau-Reaktion* zeigen die gleichen Verhältnisse wie beim Embryo C5.

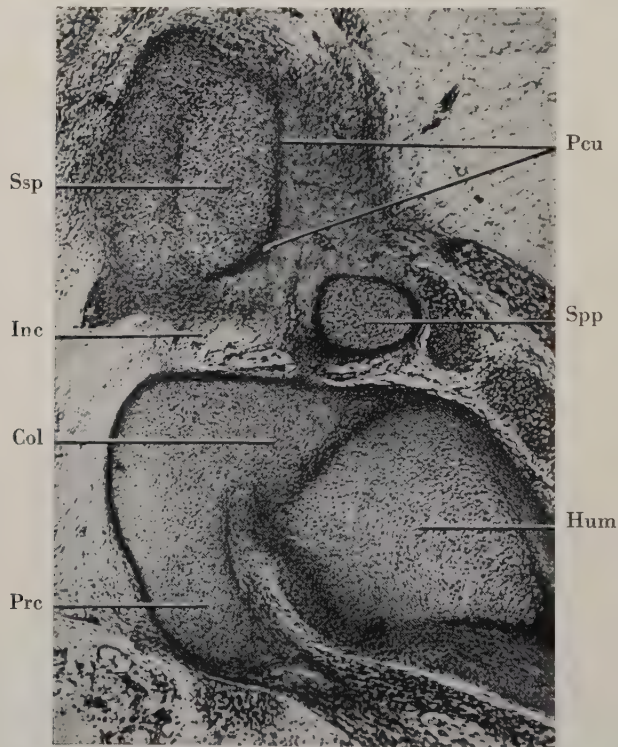


Abb. 19. Embryo C2a, 22 mm SSL, quer, 7 μ , Faserdarstellung nach Gomori, Schnitt 14/4/1, Vergr. 65 $\times$. Schnitt durch Suprascapularplatte (Ssp), Spinapfeiler (Spp), Columnregion (Col) mit Processus coracoides (Prc) und proximales Ende des Humerus (Hum). Beachte die geringe axillo-vertebrale Ausdehnung der Suprascapularplatte, die breite Incisureregion (Inc) und den riesigen Processus coracoides. In der Suprascapularplatte sind die Fasern dichter gelagert im kutanen Perichondrium (Pcu) als im kostalen (s. Text S. 87).

Faserdarstellung nach Gomori (vgl. Abb. 19): Im kostalen Perichondrium der Infraspinalplatte sind die größtenteils parallel verlaufenden Fasern dichter und in dickerer Schicht eingelagert als im kutanen. Im Bereich der Supraspinalplatte sind die Verhältnisse umgekehrt. Locker angeordnete Fasern umziehen in dicker Schicht den Margo vertebralis und axillaris.

Bei der frontal geschnittenen Scapula desselben Embryos, *Embryo C2b*, ist die Abwinkelung der Supra- gegenüber der Infraspinalplatte deutlich zu sehen. Der kraniale Teil der Infraspinalplatte ist vor allem gegen den Spinapfeiler hin auffällig stark verdickt; auch der Angulus caudalis ist mächtig aufgetrieben. Eine kostalkonvexe Krümmung der Infraspinalplatte fehlt.

Der Spinapfeiler ist dick. Von der Mitte seines gekrümmten Verlaufs zieht ein junger Knorpelsporn vertebralwärts ins Spinalblastem. Er gehört zur Anlage der Spinaleiste.

Margo vertebralis, Angulus caudalis sowie Teile der Supraspinal-

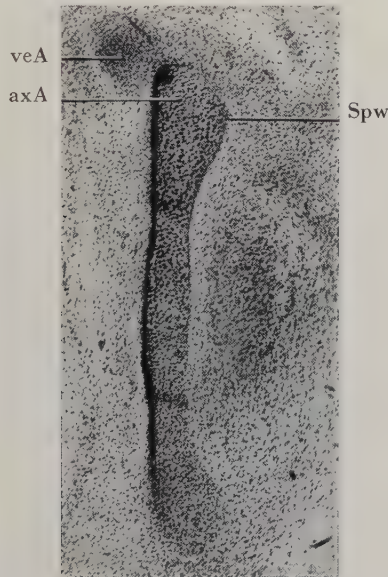


Abb. 20. Embryo C2b, 22 mm SSL, frontal, 7 μ , Glykogen, Schnitt 11/4/2, Vergr. 50 $\times$. Schnitt durch die Scapulaplatte. Die Abwinkelung der Supra- gegenüber der Infraspinalplatte ist stark; sie bildet auf der Kutanseite die Spinawurzel (Spw). Die Infraspinalplatte ist nicht kostalkonvex gekrümmt. Beachte die konzentrische Kernanordnung im «vertebralen» Supraspinalplattenanteil (veA) sowie die massive Einlagerung Glykogen-positiver Granula in der Grenzregion des axillären Anteils (axA) und im kostalen Perichondrium.

platte, der Spinaanlage und des Acromions sind blastematös. In der Supraspinalplatte sind nur ein «vertebraler», ein axillärer und ein kosto-axillärer Anteil zu unterscheiden. Der annähernd walzenförmige «vertebrale» Anteil geht an seinem vertebralen Ende kaudalwärts kontinuierlich in den reiferen Knorpel der Infraspinalplatte über; weiter axillär sind seine Knorpelzellen am Ort des bei anderen Embryonen selbstständigen intermediären Anteils konzentrisch angeordnet, so daß eine deutliche Grenze zum darunterliegenden axillären Anteil entsteht (Abb. 20). Der dünne kosto-axilläre Anteil ist kranial blastematös, kaudalwärts geht er kontinuierlich in den Knorpel des axillären Anteils über.

Das Perichondrium erreicht über der Supraspinalplatte eine Dicke bis zu 12 dichtstehenden Kernreihen. Über der Infraspinalplatte ist es auf der Kostalseite durchschnittlich halb so dick und dichter als über der Supraspinalplatte. Auf der Kutanseite ist es dicker und lockerer als kostal. Die Dickenunterschiede in kranio-kaudaler und in vertebro-axillärer Ausdehnung und die Ausbildung des Spinablastems entsprechen den oben beschriebenen Stadien.

Die Befunde bei den Spezialfärbungen stimmen mit denen der quer geschnittenen Scapula C2a überein.

Der *Embryo C3* hat eine deutlich breitere Supraspinalplatte als die beiden folgenden Embryonen. Die Infraspinalplatte zeigt keine Abwinkelung ihres axillären Drittels. Das Knorpelgewebe ist etwas reifer als beim vorhergehenden Embryo, während das Perichondrium die gleichen Verhältnisse zeigt.

Die *Embryonen C4* (Zweieigige Zwillinge A und B) haben eine weniger stark abgewinkelte Infraspinalplatte (axilläres Drittel) wie der Embryo C2a. Histologisch bestehen keine Unterschiede zum vorhergehenden Embryo.

Beim *Embryo C5* ist die Scapulaplatte im Verhältnis zu Processus coracoides und Acromion eher klein. Sie ist in verschiedenen Höhen ungleich deutlich kostal-konvex gekrümmt. Die Supraspinalplatte hat in ihrer Mitte einen vertebro-axillär verlaufenden Schlitz. Intermediärer und kosto-axillärer Anteil ragen als mächtige Vorwölbung nach kostal (Abb. 21 und 22). Die kostal-konvexe Abwinkelung des axillären Infraspinalplattendrittels fehlt hier. Der Angulus caudalis ist stark aufgetrieben. Die Breite der Infraspinalplatte nimmt kaudalwärts kontinuierlich ab. Der Spinapfeiler samt Acromion und der große Processus coracoides zeigen gegenüber dem Embryo B2 keine wesentlichen Formveränderungen.

Die vier Anteile der Supraspinalplatte sind vorhanden. Der kosto-axilläre hat im Vergleich mit den obengenannten Embryonen am meisten an Größe zugenommen. Dem intermediären Anteil lagert

sich vertebralwärts der kleine, schlecht abgrenzbare vertebrale an, der kaudalwärts mit ihm verschmilzt und dann vertebral an den axillären Anteil anschließt (Abb. 21 und 22). Der kosto-axilläre Anteil ist auf Schnitten knapp über der Spinawurzel vollständig verschwunden.

Azanfärbung: Der axilläre Anteil weist den reifsten Knorpel der Supraspinalplatte auf; er ist kranio-vertebral im Stadium B und zeigt in der Spinapfeilerwurzelregion das frühe Stadium III. Die

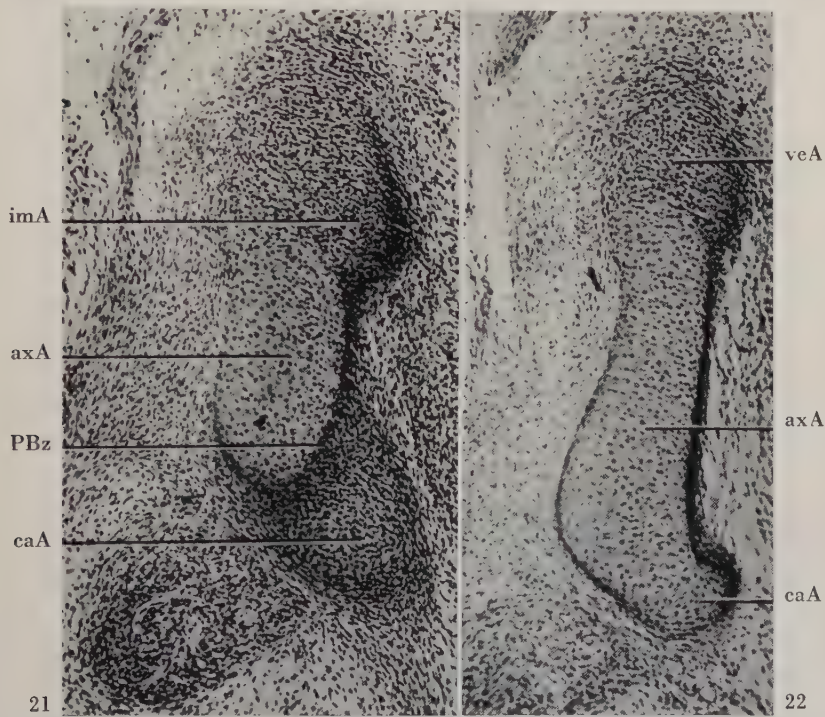


Abb. 21. Embryo C5, 19 mm SSL, quer, 8 μ , Azan, Schnitt 2a/3/4, Vergr. 80 $\times$. Schnitt durch die vier Supraspinalplattenanteile. Intermediärer (imA) und kosto-axillärer Anteil (caA) sind groß und ragen als mächtige Vorwölbungen nach kostal. Das vertebrale Ende des kosto-axillären Anteils wird durch perichondriumähnliche Blastemzellen (PBz) vom axillären Anteil getrennt. Der intermediäre Anteil ist kaum vom vertebralen abzugrenzen.

Abb. 22. Gleicher Embryo wie Abb. 21, Azan, Schnitt 2a/4/1, Vergr. 80 $\times$. Schnitt durch den kaudalen Teil der Supraspinalplatte. Der intermediäre Anteil ist mit dem vertebralen verschmolzen (veA). Der Hauptteil der Supraspinalplatte wird durch den axillären Anteil (axA) gebildet. Vom kosto-axillären Anteil (caA) ist nur das kaudal-axilläre Ende zu sehen, dessen Knorpelzellreihen kontinuierlich in die des axillären Anteils übergehen.

konzentrischen Zonen gleicher Knorpelreife in der Infraspinalplatte setzen sich auch hier in den axillären Supraspinalplattenanteil fort. Im intermediären Anteil befinden sich demgegenüber die reifsten Knorpelzellen (Stadium B) vertebro-kutan, die jüngsten (Übergang von Blastem zu Stadium A) axillo-kostal. Der vertebrale Anteil ist zum größeren Teil blastematös, zum kleineren in Stadium A. Der kosto-axilläre Anteil ist an seinem vertebralen Ende in Stadium A, ganz kranial blastematös. Vertebral wird er vom axillären Anteil durch interponierte Blastemzellen getrennt, deren Längsachsen wie im Perichondrium ausgerichtet sind (Abb.21). Sein axilläres Ende im Stadium B geht dagegen ohne Interposition von Blastemzellen in den axillären Anteil über (Abb.22). Der erwähnte Schlitz findet sich also zwischen dem vertebralen Ende des kosto-axillären und dem axillären Anteil.

Das Acromion besteht apikal aus Blastemzellen und gegen den Spinapfeiler hin aus Knorpel im Stadium I, woraus auch der Processus coracoides hauptsächlich besteht. An der Grenze zwischen Coracoidwurzel und Collumregion ist wie bei jüngeren Embryonen ein keilförmiger Bezirk in den beiden jüngsten Stadien interponiert.

Alcianblau-Reaktion (vgl. Abb.23): Der Internuklearraum im Blastem und im Perichondrium ist Alcian-negativ, im Knorpel des Stadiums A schwach positiv; in den Stadien B und I werden Interzellulärsubstanz und Cytoplasma zunehmend stärker Alcian-positiv.

Auf der Kostalseite findet sich unter dem Perichondrium, soweit es Knorpel in Stadium B oder I überzieht, ein schmaler, stark Alcian-positiver Saum von Interzellulärsubstanz, in dem Zellen mit spindelförmigen Kernen liegen; ihre Kernlängsachsen sind wie im Perichondrium angeordnet (Abb.23 und 24). In diesem subperichondral-kostalen Saum besteht an manchen Stellen ein Übergang der spindeligen zur runden Kernform der reiferen Knorpelzellen, an anderen grenzen die kleineren, spindelförmigen Kerne unmittelbar an die größeren rundlichen des benachbarten Knorpels. Der Saum fehlt im Bereich des Knorpels in Stadium A und auf der ganzen Kutanseite, wo reifere Knorpelzellen direkt ans Perichondrium grenzen (Abb.23). Im Bereich des Knorpels in Stadium II und III ist der Saum schwächer ausgeprägt oder fehlt ganz.

Das Perichondrium ist wie bei jüngeren Embryonen auf der Kostal- und Kutanseite ungleich ausgebildet, nur über der Spinapfeilerwurzel sind die Perichondriumzellkerne beidseits gleich dicht gelagert. Vertebral von der Spinapfeilerwurzel besteht das kutane

Perichondrium aus zwei Schichten, einer inneren, schmalen aus zwei Reihen von dicht gelagerten Perichondriumzellen mit spindelförmigen Kernen, und aus einer äußeren, breiten aus locker angeordneten Zellen mit ovoiden Kernen, deren Längsachsen zum größten Teil parallel laufen. Weiter vertebral- und kaudalwärts wird die innere Schicht entsprechend der abnehmenden Knorpelreife undeutlicher. Sie verschwindet schließlich vollständig, so daß in randnahen Teilen der Infraspinalplatte nur noch die lockere, breite Schicht des Perichondrium cutaneum vorhanden ist.

Das Spinablastem, welches in Lage und Ausdehnung der nachmaligen Spina bereits weitgehend entspricht, zieht vom Margo vertebralis als breiter Strang zum kutanen Perichondrium des Spinapfeilers und von dessen Perichondrium costale in einem kutan-konvexen Bogen zum Perichondriumblastem des Supraspinalplattenrandes, der die Incisuraregion vertebral begrenzt. Es ist vom umgebenden Gewebe durch seine Zelldichte und die Ordnung der Längsachsen seiner ovoiden Kerne unterschieden. Die Zelldichte nimmt gegen die Scapulaplatte hin ab.

PAS-Reaktion: Alle Teile, die blastematös oder als Knorpel in den beiden jüngsten Stadien vorhanden sind, zeigen auf der Kostalseite eine Häufung PAS-positiver Granula in den Internuklearräumen; ihre Anzahl nimmt kutanwärts rasch ab. Der zwischen Cora-

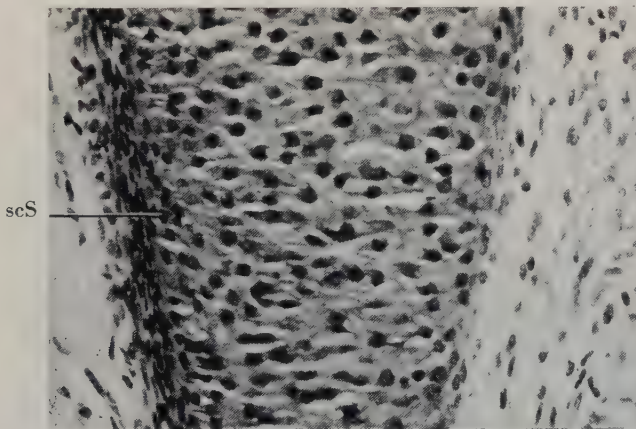


Abb. 23. Gleicher Embryo wie Abb. 21, Alcianblau, Schnitt 2b/3/1, Vergr. 255 $\times$. Schnitt durch die Infraspinalplatte. Beachte den stark Alcian-positiven subperichondralen Saum (scS) junger Knorpelzellen auf der Kostalseite (s. Text S. 90) und die Strukturunterschiede im kostalen und kutanen Perichondrium, dessen Cytoplasma beidseits Alcian-negativ ist.

coidwurzel und Collumregion interponierte Knorpel von geringerer Reife wird durch die PAS-negative Reaktion seiner Interzellulärsubstanz verdeutlicht.

Die übrigen Befunde decken sich mit denen beim Embryo B7, nur daß bei unserem Embryo ein deutlicher subperichondraler Saum vorhanden ist (Abb. 24).

Beim *Embryo C6* ist die Infraspinalplatte in ihrem axillären Drittel nicht abgewinkelt. Die Supraspinalplatte besteht wie beim Embryo C2a nur aus einem «vertebralen», kosto-axillären und axillären Anteil. Zwischen dem «vertebralen» und dem axillären Anteil reicht eine keilförmige Region junger Knorpelzellen weit kaudalwärts bis in die Infraspinalplatte.

An der Scapula des *Embryo C7* sind alle vier Supraspinalplattenanteile zu erkennen. Der intermediäre Anteil ist gut ausgebildet, springt aber nicht gegen kostal vor wie in jüngeren Stadien.

Unter dem kostalen Perichondrium, soweit es Knorpel in Stadium II und III bedeckt, ist ein subperichondral-kostaler Saum junger Knorpelzellen vorhanden.

MP-Reaktion: Die Interzellulärsubstanz der Infraspinalplatte ist kostal stärker metachromatisch gefärbt als kutan, vor allem in den Stadien II und III.

Glykogen-Färbung: Interzellulärsubstanz und Cytoplasma der Knorpelzellen verhalten sich gleich wie beim Embryo C2. Der subperichondral-kostale Saum in der Infraspinalplatte zeigt eine schwächer Glykogen-positive Interzellulärsubstanz als die angrenzenden



Abb. 24. Gleicher Embryo wie Abb. 21, PAS-Reaktion, Schnitt 2c/6/4, Vergr. 255 $\times$. Beachte den gut sichtbaren subperichondral-kostalen Saum (s. Text S. 90) und die massive Einlagerung PAS-positiver Granula im kostalen Perichondrium.

älteren Knorpelstadien. Axillärer, kosto-axillärer und intermediärer Supraspinalplattenanteil, die vorwiegend aus den beiden jüngsten Knorpelstadien bestehen, haben auf der Kostalseite im Zwischenkernraum Glykogen-positive Granula eingelagert, deren Größe und Anzahl kutanwärts abnehmen, ähnlich wie beim Embryo B9. Der kostale Teil der Grenzzone zwischen vertebralem und intermediärem Anteil ist auffallend stark Glykogen-positiv.

Das Perichondrium verhält sich wie bei den beiden jüngeren Embryonen mit Glykogen-Färbung, B9 und C2.

Der *Embryo C8* ist der Form nach weitgehend gleich wie der vorhergehende. Die vier Supraspinalplattenanteile sind kaudal miteinander verschmolzen, ganz kranial jedoch noch deutlich zu erkennen. Das Perichondrium cutaneum ist stellenweise zweischichtig.

Beim *Embryo C9* sind die vier Anteile der Supraspinalplatte nicht einzeln zu erkennen. Es ist nur ein «vertebraler» und ein «axillärer» Anteil zu unterscheiden. Die Infraspinalplatte ist in ihrem axillären Drittel nicht abgewinkelt. Ihr Margo vertebralis ist kranial wulstig verdickt.

Im Gegensatz zu den vorhergehenden Stadien ist beim *Embryo C10* zwischen dem dicken intermediären und dem dünnen kosto-axillären Supraspinalplattenanteil keine Senke im Margo cranialis vorhanden. Die Supraspinalplatte hat einen Schlitz. Am Spinapfeiler ist ein deutlicher, vertebralwärts gerichteter Knorpelsporn zu sehen, der zur Anlage der Spinaleiste gehört.

In der Schlitzregion sind zwischen dem vertebralen Ende des intermediären (eventuell auch ein Teil des kosto-axillären) und dem axillären Anteil mehrere Reihen von Perichondriumzellen mit geordneten Kernlängsachsen interponiert, wodurch auf einer kurzen vertebro-axillären Strecke eine isolierte Knorpelspange zustande kommt.

Das Perichondrium ist kostal und kutan zweischichtig soweit es Knorpel im Stadium II oder III überzieht. In der äußeren Schicht ist der Kernabstand geringer.

Der *Embryo C11* zeigt gleiche Verhältnisse wie der vorhergehende, jedoch ist am Spinapfeiler kein vertebralwärts gerichteter Knorpelsporn vorhanden und das kostale Perichondrium ist nirgends zweischichtig.

Beim *Embryo C12* sind die Befunde kaum verschieden von denen beim vorhergehenden. An der axillären Supraspinalplattenkante ragt ein großer Knorpelsporn ins Perichondriumblastem der Incisuraregion. Der vertebralwärts gerichtete Knorpelsporn am Spinapfeiler ist deutlich ausgebildet.

MP-Reaktion: Vom Knorpelstadium I an ist die metachromatische Reaktion der Interzellulärsubstanz viel stärker gegen die Kostalseite hin als gegen die Kutanseite.

Glykogen-Färbung: Der subperichondrale Saum auf der Kostalseite ist, wo er an Knorpel im Stadium II und III angefügt ist, besonders deutlich.

Gruppe D: Reifezentrum in Stadium IV

Beim *Embryo D1* ist die Scapulaplatte im Verhältnis zu Processus coracoides und Collumregion größer und dünner als bei den

jüngeren Embryonen. Der Margo vertebralis ist nur im kaudalen Bereich der Supraspinalplatte aufgetrieben. Diese ist dick und zeigt in ihren verschiedenen Anteilen Auftreibungen. Die Infraspinalplatte ist leicht kostal-konvex gekrümmt.

Die Supraspinalplatte besteht aus vier Anteilen. Der vertebrale Anteil ist kranial eine schmale, kranio-kaudal gerichtete blastematische Leiste, die kaudalwärts größer wird, in jungen Knorpel übergeht und auf gleicher Höhe deutlich gegen kutan vorspringt. Noch kranial von der Spinawurzel verschmilzt er mit dem intermediären Anteil und springt hier nicht mehr kutanwärts vor. Der intermediäre Anteil ist kaudal mit dem axillären verschmolzen. Er ragt nur wenig nach kostal vor. Der kosto-axilläre Anteil geht an seinem axillären Ende kontinuierlich in den axillären über. Das Vorhandensein eines Schlitzes ist nicht mehr sicher festzustellen. Im kaudalen Bereich der Supraspinalplatte gliedern sich die Zonen gleicher Knorpelreife wie in der Infraspinalplatte.

Das Perichondrium cutaneum ist über der Supraspinalplatte blastemähnlich. Es nimmt hier den Raum zwischen M. supraspinatus und der Kutanfläche des Knorpels ein und besteht aus weit auseinanderliegenden Zellen mit großen, ovoiden Kernen, deren Längsachsen nur teilweise parallel gerichtet sind. Im kaudalen Bereich der Supraspinalplatte sind deren axilläre Hälfte, Spinapfeiler und Collumregion samt Coracoidwurzel von einem gemeinsamen, lockeren Perichondriumblastem umgeben. In ihm läßt sich ganz kranial auf der Kostalseite die Anlage des Lig. transversum beobachten, dessen dichtgelagerte Zellen parallel geordnete, spindelförmige Kerne haben. Weiter kaudal ist auf der Kutanseite das zellreiche Spinablastem mit seinen polymorphen Kernen zu erkennen. In und um das Perichondriumblastem sind spärlich Gefäße eingelagert. Über der Infraspinalplatte besteht das kutane Perichondrium aus Zellen mit spindelförmigen kleinen Kernen, deren Längsachsen parallel gerichtet sind. Soweit es Knorpel in den Stadien II bis IV überzieht, ist es zweischichtig. In der inneren Schicht ist der Kernabstand groß, in der äußeren klein. Über dem Spinapfeiler ist das kutane Perichondrium dünn und dicht.

Zwischen Processus coracoides und Collumregion sind junge Zellen interponiert. Das Acromion besteht aus Knorpel in den Stadien A und B.

Der *Embryo D2* entspricht weitgehend dem *Embryo E4*. Nahe am Margo vertebralis ist die Supraspinalplatte hoch, senkt sich in

der Mitte etwas ab und erreicht kurz vor dem steilen Abfall gegen die Incisuraregion ihre größte Höhe. Am Ort des Schlitzes verläuft beidseits eine vertebro-axillär gerichtete Rinne.

In der Supraspinalplatte sind intermediärer, kosto-axillärer und axillärer Anteil zu unterscheiden, wobei die Grenze zwischen den beiden ersteren nicht genau auszumachen ist. Der vertebral hohe intermediäre Anteil besteht hauptsächlich aus Knorpel in Stadium I. Axillärwärts wird er niedriger und kranio-kutan unreifer. Gegen kaudal wird er durch eine Zone unreifen Knorpels begrenzt, die vertebral auf Höhe der Spinawurzel liegt und axillärwärts mehr und mehr nach kranial in die Supraspinalplatte steigt, entsprechend der zunehmenden Unterlagerung durch den axillären Anteil. Der kosto-axilläre Anteil sitzt dem axillären mit seiner ganzen Basis auf. Im mittleren Teil der Supraspinalplatte deutet der Verlauf der Knorpelzellreihen in diesen beiden Anteilen auf eine frühere Schlitzbildung hin, es ist jedoch nirgends eine Interposition von Perichondriumzellen zu finden. Weiter axillär verlaufen die Knorpelzellreihen gleichsinnig und der kosto-axilläre Anteil ist nur noch an seiner Unreife vom darunterliegenden zu unterscheiden.

In der Incisuraregion und über der Spinawurzel finden sich Gefäße im lockeren Perichondriumblastem.

Schon vertebral von der Mitte der Scapulaplatte tritt im Spinazipfel des Perichondriumblastems das kleinzellige, polymorphkernige Spinablastem auf, welches axillärwärts größer wird und sich bis zum Spinapfeiler fortsetzt.

Der *Embryo D3* weicht in seiner Scapulaform nicht wesentlich vom vorhergehenden ab. Die Befunde bei der MP-Reaktion entsprechen denen beim Embryo E10 und die bei Glykogen-Färbung denen beim Embryo D4.

PAS-Reaktion: Im kosto-axillären Supraspinalplattenanteil sind auf der Kostalseite gehäuft PAS-positive Granula im Zwischenkernraum eingelagert. Das Spinablastem und das Lig. transversum enthalten im Cytoplasma ihrer Zellen gehäuft PAS-positive Granula.

Beim *Embryo D4* verhalten sich die Höhen von Supra- zu Infraspinalplatte wie 1:4. Die Supraspinalplatte ist im Unterschied zu den Beobachtungen bei jüngeren Embryonen schon vertebral deutlich gegenüber der Infraspinalplatte abgewinkelt. Ihre Höhe nimmt von vertebral nach axillär gleichmäßig zu. In ihrer Mitte hat sie einen vertebro-axillär verlaufenden Schlitz zwischen dem kosto-

axillären und dem axillären Anteil. Die kostal-konvexe Krümmung der Infraspinalplatte ist nur geringgradig und nur axillär vorhanden.

Die Supraspinalplatte läßt nur zwei Anteile erkennen. Der intermediäre Anteil ist ganz mit der Infraspinalplatte, resp. weiter axillär mit dem axillären Anteil verschmolzen. Seine Knorpelreife entspricht wie die des axillären Anteils dem Abstand vom Reifezentrum. Von vertebral kommend sitzt etwas vor der Supraspinalplattenmitte ein axillärwärts größer werdendes Blastem kappenartig auf dem intermediären Anteil. Weiter axillär treten in ihm kranial Knorpelzellen auf, die sich danach zu einer dünnen Platte formieren und als kosto-axillärer Anteil, durch Blastemzellen getrennt, auf dem axillären Anteil aufsitzen und dadurch einen Schlitz bilden. Der kosto-axilläre Anteil ist im Unterschied zu anderen Embryonen gleicher Reife auch an seinem axillären Ende vom darunterliegenden axillären durch jüngere Knorpelzellen abgegrenzt. Von ihm aus geht ein gut entwickelter, nach axillär gerichteter Knorpelsporn kontinuierlich ins Perichondriumblastem der Incisuraregion über. Der axilläre Anteil verliert von der Schlitzregion gegen axillär zusehends an Höhe, im Gegensatz zum kosto-axillären, der zunimmt.

Das Perichondrium ist außer an der Kutanfläche der Supraspinalplatte gut gegen die Umgebung abgegrenzt. Über der Supraspinalplatte ist es beidseits breiter als über der Infraspinalplatte. Es ist auf der Kutanseite, soweit es Knorpel in den Stadien II bis IV überzieht, zweischichtig. Der Spinapfeiler hat kutan ein dünnes, dichtes Perichondrium, kostal wird er vom lockeren Perichondriumblastem der Incisuraregion begrenzt. Kranio-axillär sind auch hier Gefäße im Perichondrium eingelagert.

Bereits in der Nähe des Margo vertebralis ist im Spinazipfel des Perichondriums das Spinablastem zu erkennen, welches sich axillärwärts fortsetzt und an den Knorpelsporn des Spinapfeilers anschließt.

Die Befunde bei der MP-Reaktion entsprechen denen beim Embryo E 10.

Glykogen-Färbung: Das Cytoplasma der Knorpelzellen in den drei jüngsten Stadien ist nur schwach Glykogen-positiv, dasjenige älterer Zellen (Stadien II bis IV) verhält sich je nach Lokalisation verschieden. Die Knorpelzellen des subperichondral-kostalen Saumes haben ausnahmslos ein negatives oder nur schwach positives Cytoplasma. Im kosto-axillären Supraspinalplattenanteil sind auf der Kostalseite an der kaudalen Grenze des kappenartigen Blastems Glykogen-positive Granula im Zwischenkernraum eingelagert. Weiter axillär sind die Granula auf der ganzen Kostalseite und in den kaudal vom axillären Anteil anschließenden jungen Knorpelzellen

angehäuft. Es bestehen nur geringe Unterschiede in der Lokalisation Glykogen-positiver Granula verglichen mit den Embryonen B9, C2 und C7.

In den Randblastemen, in der Incisuraregion und im kutanen Perichondrium mit dem darinliegenden Spinablastem sind nur wenige Glykogen-positive Granula im Zwischenkernraum eingelagert.

Gruppe E: Reifezentrum in Stadium V

Die Supraspinalplatte des *Embryo E1* hat in ihrer Mitte einen deutlichen, vertebro-axillär verlaufenden Schlitz (Abb.25). Der Margo vertebralis der Infraspinalplatte ist nach kutan abgewinkelt, wobei diese Abwinkelung kaudalwärts abnimmt. Die Infraspinalplatte ist nicht kostal-konvex gekrümmt. In der Supraspinalplatte ist der intermediäre Anteil deutlich dünner als der axilläre; zwischen den beiden liegende jüngere Knorpelzellen sind noch weit kaudalwärts zu verfolgen. Die Begrenzung des kosto-axillären Anteils ist kaum zu erkennen, nur die Anordnung der kostalwärts jünger werdenden Zellen weist auf die Grenze zwischen ihm



Abb. 25. Embryo E1, 25 mm SSL, quer, 8 μ , Azan, Schnitt 149/3/2, Vergr. 65 $\times$. Schnitt durch die Supraspinalplatte. Oben im Bild der intermediäre (imA), unten der axilläre (axA) und der kosto-axilläre Anteil (caA). Beachte die Schlitzregion (Slr), die zwischen dem vertebralen Ende des kosto-axillären und dem axillären Anteil liegt (s. Text S. 98).

und dem axillären Anteil hin. Der Schlitzbereich zwischen kosto-axillärem und axillärem Anteil wird von großkernigen Perichondriumblastenzellen ausgefüllt (Abb. 25). Ein subperichondral-kostaler Saum junger Knorpelzellen fehlt.

Die Perichondriumverhältnisse entsprechen denen beim Embryo D1.

Beim *Embryo E2* bestehen folgende Unterschiede gegenüber dem vorhergehenden: Es ist kein Schlitz in der Supraspinalplatte vorhanden. Die vertebrale Hälfte der Supraspinalplatte ist halb so dick wie die axilläre. Der Margo vertebralis der Infraspinalplatte ist gegen kostal abgewinkelt. Die Supraspinalplatte besteht aus einem dünnen «vertebralen» und einem dicken «axillären» Anteil, zwischen denen eine Zone jüngerer Knorpelzellen liegt.



Abb. 26. Embryo E3, 27 mm SSL, frontal, 6 μ , Azan, Schnitt 71/2, Vergr. 32 $\times$. Schnitt durch die Scapulaplatte. Kutan von der Spinawurzel (Spw) ist das Spinalblastem (SpB) zu sehen. Man beachte das Verhältnis von Supra- zu Infraspinalplattenhöhe, das Fehlen einer kostal-konvexen Krümmung der Infraspinalplatte und die sprunghafte Umwandlung von Perichondrium zu Knorpel (Aeb) am kranialen und kaudalen Rand der Scapulaplatte, die über den reiferen Knorpelstadien nicht vorhanden ist.

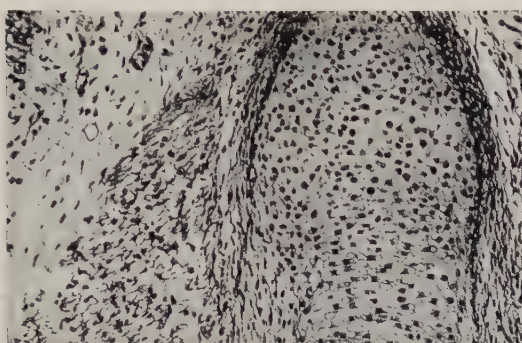


Abb. 27. Ausschnitt aus Abb. 26 mit dem kranialen Teil der Supraspinalplatte. Vergr. 120 $\times$. Von kaudal nach kranial ist die gleichzeitige Umwandlung einer breiten Lage von Perichondrium- zu Knorpelzellen zu verfolgen.



Abb. 28. Ausschnitt aus Abb. 26 mit dem kaudalen Teil der Infraspinalplatte. Vergr. 120 $\times$. Auf der Kutanseite scheint die Knorpelgrenze weit ins Perichondrium verlegt. Die Perichondriumzellen werden «en bloc» zu Knorpelzellen umgewandelt. In den äußersten Lagen haben die Knorpelzellen noch die spindelige Kernform der Perichondriumzellen, während in den inneren Lagen eine Angleichung der Kernform an die rundlichen Kerne des angrenzenden reiferen Knorpelgewebes zu beobachten ist.

Der *Embryo E3* entspricht mit Ausnahme der Supraspinalplatte weitgehend dem folgenden. Die Supraspinalplatte steigt bis kurz vor dem Abfall der Incisuraregion gleichmäßig auf eine maximale Höhe an. Sie ist axillär nur wenig dünner als vertebral. Ein Schlitz fehlt ihr; in ihrer axillären Hälfte sind beidseitige vertebro-axillär verlaufende Rinnen angedeutet. Sie läßt keine verschiedenen Anteile erkennen. In ihr nimmt die Knorpelreife überall von kranial gegen die Infraspinalplatte gleichmäßig zu. Am Ort des kosto-axillären Anteils und am Angulus caudalis gewinnt die Scapulaplatte an Dicke durch eine sprunghafte Umwandlung von lockerem Perichondrium zu jungem Knorpel (Abb. 26 bis 28). Ein subperichondral-kostaler Saum junger Knorpelzellen fehlt.

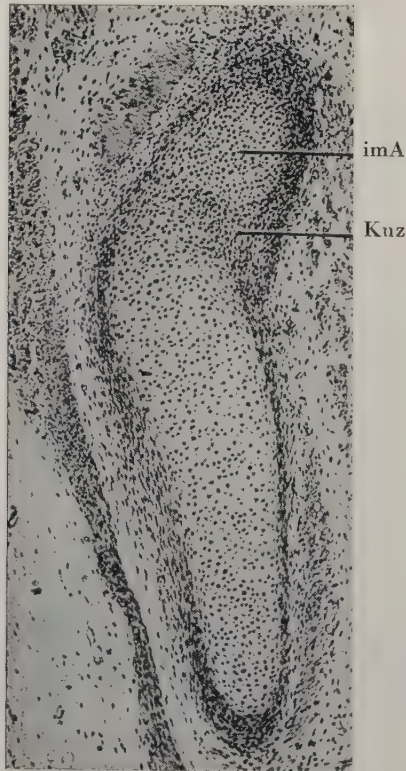


Abb. 29. Embryo E4, 28 mm SSL, frontal, 7μ , Azan, Schnitt 38/1, Vergr. $65\times$. Schnitt durch die Scapulaplatte. In der Supraspinalplatte ist der intermediäre Anteil getroffen (imA), der auf der Kutanseite kaudalwärts kontinuierlich in den axillären übergeht, kostal jedoch durch junge Knorpelzellen von ihm abgrenzbar ist (Knz). Das Spinalblastem fehlt, da es bei diesem Embryo nur wenig weit vertebralwärts reicht.

Die Supraspinalplatte des *Embryo E4* hat in ihrer Mitte einen deutlichen Schlitz, der axillärwärts in beidseitige Rinnen übergeht. Ihre Dicke variiert stark. Die Collumregion und der Processus coracoides sind im Verhältnis zur Scapulaplatte gegenüber den jüngeren Embryonen auffallend klein.

In der Supraspinalplatte sind der intermediäre, der kosto-axilläre und der axilläre Anteil in gewohnter Anordnung zu unterscheiden. Die kaudale Begrenzung des intermediären Anteils ist nur auf der Kostalseite durch eine keilförmige Zone junger Knorpelzellen angedeutet, während kutan ein kontinuierlicher Übergang in den Knorpel der Infraspinalplatte besteht (Abb.29). Die Basis des inter-



Abb.30. Gleicher Embryo wie Abb.29, Schnitt 51/1, Vergr.40×. Schnitt durch die Scapulaplatte. Kosto-axillärer (caA) und axillärer Supraspinalplattenanteil (axA) werden in der Schlitzregion (Slr) durch eigene Perichondrien voneinander getrennt. Das Spinablastem (SpB) ist gegenüber der Spinawurzel etwas nach kaudal verschoben.

mediären Anteils ist überall gleich dick wie das darunterliegende Knorpelgewebe. An ihn schließt axillärwärts der kosto-axilläre Anteil an, der mit dünner Basis auf dem breiteren axillären sitzt. Zwischen diesen beiden Anteilen besteht ein Schlitz, wobei der kosto-axilläre Anteil wie ein Handgriff auf dem axillären aufgesetzt ist. Das dünne vertebrale Ende des kosto-axillären Anteils besteht kranial aus reiferem Knorpel als kaudal, wo er sprunghaft in den reiferen Knorpel des axillären Anteils übergeht. Der dickere Mittelteil ist im Schlitzbereich durch ein eigenes Perichondrium vom axillären Anteil getrennt (Abb.30) und sein dünnes axilläres Ende geht kaudalwärts kontinuierlich in dessen Knorpel über. Vom kosto-axillären Anteil aus zieht ein dünner Knorpelsporn axillärwärts ins Perichondriumblastem (Abb.31).

Beim *Embryo E5* besteht die Supraspinalplatte aus einer grotesk geformten Platte mit einer dünnen, schmalen, nach kostal abgewinkelten Leiste an ihrem vertebralen Rand, die kranialwärts vorerst größer wird und danach ganz verschwindet. Die vertebral von der Collumregion verlaufende kranio-kaudale Rinne auf der Kostalseite der Scapulaplatte ist seicht. Im kranialen Teil der Infraspinalplatte ist eine vertebrale, nach kostal abgewinkelte Leiste vorhanden, die kaudalwärts verschwindet. Vom gebogenen Spinapfeiler ragt ein kleiner Knorpelsporn vertebralwärts.

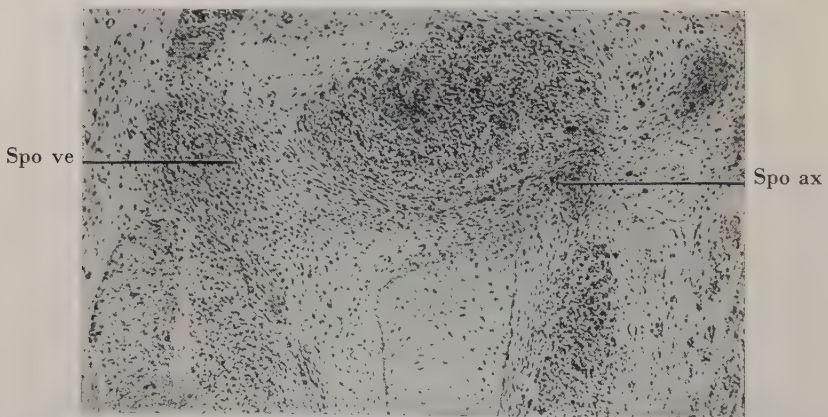


Abb. 31. Gleicher Embryo wie Abb.29, Schnitt 70/3, Vergr.50×. Schnitt durch die Scapulaplatte. Über der kranio-kostalen Kante der Infraspinalplatte ist der vom kosto-axillären Supraspinalplattenanteil axillärwärts reichende Knorpelsporn zu sehen (Spo ax). Beachte den vertebralwärts gerichteten Knorpelsporn (Spo ve) zwischen der supra- und infraspinalen Portion des M. trapezius, der mit dem Spinapfeiler kontinuierlich ist (nicht sichtbar).

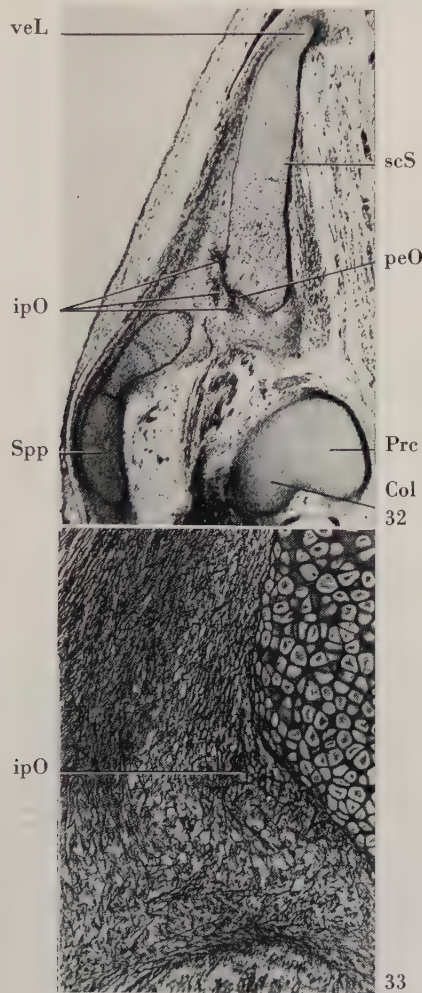


Abb. 32. Embryo E5, 32 mm SSL, quer, 8μ , Azan, Schnitt 6/6/2, Vergr. $20\times$. Schnitt durch die Supraspinalplatte, die Collumregion (Col) mit dem Abgang des Processus coracoides (Prc) und den Spinapfeiler (Spp). Die axilläre Begrenzung der nach kostal abgewinkelten vertebralen Leiste (veL) ist eben noch zu erkennen. Man beachte den subperichondral-kostalen Saum (scS) junger Knorpelzellen, der über den unreifsten Knorpelstadien fehlt, sowie die intraperichondralen (ipO) und perichondralen Ossifikationsherde (peO) kutan im lockeren Perichondriumblastem, das den Winkel zwischen Supraspinalplatte und Spinapfeiler ausfüllt.

Abb. 33. Gleicher Embryo wie Abb. 32, Faserdarstellung nach Gomori, Schnitt 9/3/1, Vergr. $80\times$. Schnitt durch die kutan-axilläre Kante der Scapulaplatte auf Höhe des Spinablastems. Beachte die intraperichondralen Ossifikationsherde (ipO) im lockeren Perichondriumblastem (s. Text S. 105).

In der Supraspinalplatte sind keine deutlichen Grenzen zwischen einzelnen Anteilen zu erkennen. Auf mittlerer Höhe sind jüngere Knorpelzellen, vor allem auf der Kutanseite, zwischen dem pfeilerartigen «axillären» Anteil und der dünnen vertebral anschließenden Platte interponiert. Auch im kaudalen Teil der Supraspinalplatte ist am Verlauf der Knorpelzellreihen eine Grenze zwischen der grotesk geformten Platte und der nach kostal abgewinkelten vertebralen Leiste zu erkennen (Abb. 32). Nahe am Margo vertebralis werden auf der Kutanseite Perichondriumzellen gesamthaft zu Knorpel umgewandelt, es findet gleichsam eine Assimilation an das Knorpelgewebe statt. Dieselbe Erscheinung haben wir schon beim Embryo E3 angetroffen. Auf der Kostalseite der Scapulaplatte ist – wie schon bei einzelnen jüngeren Embryonen – subperichondral ein verschieden dicker Saum junger Knorpelzellen vorhanden (Abb. 32), der nur über den randnahen jüngsten Knorpelstadien fehlt. Über dem Reifezentrum ist er kaum feststellbar.

Im Perichondriumblastem sind die Gebiete mit Gefäßeinlagerung und intraperichondral gelegenen Ossifikationsherden (s. unten) wesentlich kleiner als beim Embryo E9.

Alcianblau-Färbung: Die Knorpelinterzellulärsubstanz zeigt eine Zunahme der Färbbarkeit bis zum Stadium III. In den Stadien IV und V nimmt sie mit Ausnahme der Knorpelzellhöhlenwände ab. Im Gebiet des subperichondral-kostalen Saumes ist sie nur gering, womit sie sich umgekehrt verhält wie beim Embryo C5. Die Färbbarkeit des Cytoplasmas nimmt bis zum Stadium IV zu; im Stadium V ist sie geringer (vgl. Embryo C5).

PAS-Reaktion: Eine kosto-kutane Differenz der Färbbarkeit besteht nur im Bereich des subperichondral-kostalen Saumes, wo das Cytoplasma der Knorpelzellen weniger PAS-positiv ist als das der angrenzenden Knorpelzellen. Die intraperichondralen Ossifikationsherde (s. unten) haben eine schwach PAS-positive Interzellulärsubstanz. Das am Margo vertebralis teilweise blastematöse Perichondrium enthält PAS-positive Granula im Zwischenkernraum.

Gomori-Faserdarstellung: In der Interzellulärsubstanz des Knorpels sind dunkle Granula eingelagert, die im Gebiet des subperichondral-kostalen Saumes deutlich vermindert sind. Im ganzen Perichondrium finden sich Fasern. Sie sind auf der Kostalseite sehr dicht und parallel angeordnet, so daß auf Schnitten ein dunkles Band erscheint. Das kutane Perichondrium enthält in seiner inneren Schicht vorwiegend argyrophile Fasern in loser, unregelmäßiger Anordnung,

während in seiner äußeren Schicht dichtstehende, parallel laufende kollagene Fasern vorherrschen. Im lockeren Perichondriumblastem der Spina- und Incisuraregion liegen unterschiedlich dicke Fasern verschiedener Verlaufsrichtung, die sich in den intraperichondralen Ossifikationsherden zu einem Netz aus argyrophilen und kollagenen Fasern vereinigen (Abb. 33), vergleichbar mit den Verhältnissen bei der desmalen Ossifikation. Wie in den anderen Färbungen deutlicher zu sehen ist, liegen in den Maschen dieser Netze Osteoblasten, die Osteoid produzieren. Das Spinablastem enthält ein besonders dichtes Netz argyrophiler Fasern. Am kranio-kostalen Rand des Perichondriumblastems der Incisuraregion fällt das Lig. transversum durch seinen Reichtum an kollagenen Fasern mit paralleler Verlaufsrichtung auf.

MP-Reaktion: Im Bereich des subperichondral-kostalen Saumes ist die Metachromasie der Interzellulärsubstanz im Gegensatz zu den Embryonen C5, C7, C12 und E10 deutlich geringer als im angrenzenden Knorpel. Die Osteoblasten in den intraperichondralen Ossifikationsherden haben ein leuchtend rotes Cytoplasma, was auch für die Osteoblasten der perichondralen Ossifikationsherde zutrifft (Abb. 34).

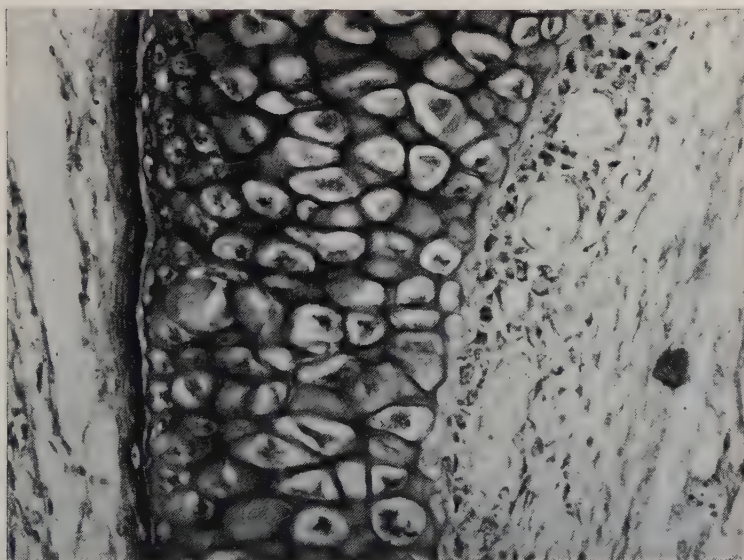


Abb. 34. Gleicher Embryo wie Abb. 32, MP-Reaktion, Schnitt 15/4/1, Vergr. 200 $\times$. Schnitt durch den kranialen Teil der Infraspinalplatte. Beachte die Abnahme der Metachromasie im subperichondral-kostalen Saum und gegen die Kutanseite hin, die perichondrale Ossifikation auf der Kutanseite (s. Text) sowie das stark gefärbte Cytoplasma im kostalen Perichondrium.

Glykogen-Färbung: Kosto-kutane Färbeunterschiede der Knorpelinterzellulärsubstanz bestehen nur im kranialen Teil der Supraspinalplatte und ganz kaudal in der Infraspinalplatte. Im Gebiet des subperichondral-kostalen Saumes ist die Interzellulärsubstanz nicht verschieden stark gefärbt. Das Cytoplasma der Knorpelzellen ist im Stadium V am stärksten Glykogen-positiv; die jüngeren Knorpelzellen zeigen eine schwächer werdende Reaktion. Die jungen Knorpelzellen des subperichondral-kostalen Saumes haben im Unterschied zu den Embryonen D3 und D4 ein stark Glykogen-positives Cytoplasma (Abb. 35). Im blastematösen Perichondrium am Margo vertebralis sind Glykogen-positive Granula im Zwischenkernraum eingelagert.

Mit der *Methode nach Krutsay* sind keine Calciumverbindungen nachweisbar.

Die Supraspinalplatte des *Embryo E 6* hat in ihrer Mitte einen großen vertebro-axillär verlaufenden Schlitz. Sie ist kranio-vertebral beträchtlich dünner als in den übrigen Gebieten. Im kranialen Teil der Infraspinalplatte ist der Margo vertebralis nach kostal abgewinkelt. Eine kostal-konvexe Krümmung der Infraspinalplatte fehlt.

Mit Ausnahme des «vertebralen» Supraspinalplattenanteils besteht die übliche Verteilung der Knorpelzonen gleicher Reife. Die Supraspinalplatte besteht aus einem «vertebralen» und einem «axillären» Anteil. Der Margo vertebralis ist blastematös. Der Schlitz zwischen dem «vertebralen» und dem «axillären» Anteil ist durch

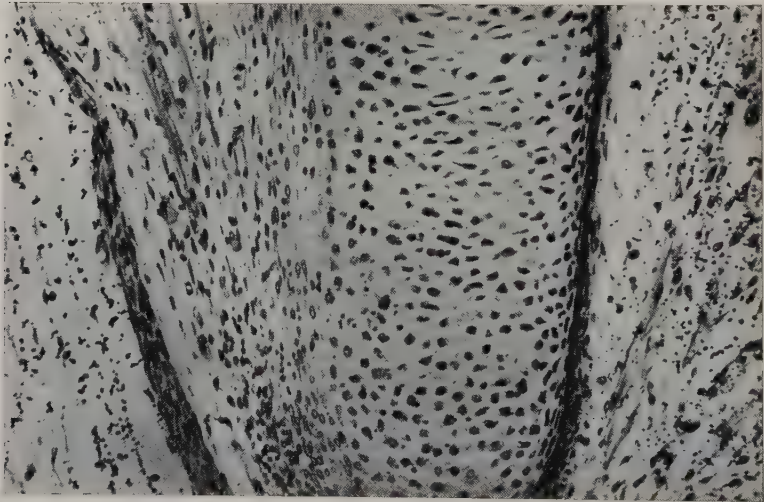


Abb. 35. Gleicher Embryo wie Abb. 32, Glykogen, Schnitt 15/2/3, Vergr. 175 $\times$. Schnitt durch die vertebrale Hälfte der Infraspinalplatte. Beachte das stark Glykogen-positive Cytoplasma der Knorpelzellen im subperichondral-kostalen Saum und die stark Glykogen-positive Reaktion des kostalen Perichondriums.

lockeres Perichondriumblastem ausgefüllt. Kaudal vom Schlitz ist die Grenze zwischen den beiden Anteilen durch Interposition von jüngeren Knorpelzellen noch bis in die kraniale Region der Infraspinalplatte zu verfolgen. Ein subperichondral-kostaler Saum junger Knorpelzellen fehlt.

Zwischen Coracoidwurzel und Collumregion sind auch hier jüngere Knorpelzellen eingeschoben.

Das Perichondrium weist gegenüber dem Embryo E1 folgende Veränderungen auf: In der Umgebung der Spinapfeilerwurzel und im Incisuragebiet sind im lockeren Perichondriumblastem massenhaft große Gefäße vorhanden. Die gefäßreiche Perichondriumzone reicht bis in den kaudalen Teil der Supraspinalplatte und bis in den kranialsten Abschnitt der Infraspinalplatte. Ihre Ausdehnung ist auf der Kutanseite allseitig größer als kostal. Innerhalb der gefäßreichen Perichondriumzone sind mehrere intraperichondrale Ossifikationsherde vorhanden, die teilweise in Zusammenhang mit der jungen perichondralen Knochenmanschette stehen, teilweise frei im Perichondriumblastem liegen. Sie bestehen aus einer faserreichen Interzellulärsubstanz mit unvollständig eingeschlossenen Osteoblasten. Die Zone mit intraperichondralen Ossifikationsherden ist also gleich lokalisiert, aber allseitig weniger ausgedehnt wie die gefäßreiche Zone. Die äußere Schicht des Perichondriums ist auffallend faserreich. Im kranialen Bereich der Infraspinalplatte hat auch das dünne, dichte Perichondrium costale zwei Schichten, soweit es Knorpel im Stadium V überzieht. Seine äußere Schicht ist ebenfalls faserreich und besteht aus Zellen mit spindelförmigen Kernen, die innere dagegen besteht aus Osteoblasten mit rundlichen Kernen.

Der *Embryo E7* zeigt gegenüber dem Embryo E9 nur wenige Unterschiede. Die Supraspinalplatte ist eine einheitliche dicke Platte ohne Grubenbildungen, die axillär- und vertebralwärts kontinuierlich dünner wird. In ihr sind keine verschiedenen Anteile zu unterscheiden. Ebenso fehlt in ihr und in der Infraspinalplatte eine sprunghafte Assimilation von Perichondrium- zu Knorpelzellen.

Beim *Embryo E8* bestehen folgende Abweichungen gegenüber dem Embryo E9. Die Supraspinalplatte ist wie beim vorhergehenden Embryo ausgebildet, was die Form betrifft, sie besteht jedoch aus einem großen «axillären» und einem kleinen «vertebralen» Anteil, die durch jüngere Knorpelzellen so miteinander verbunden sind, daß an der Oberfläche keine Grenze zu erkennen ist. Im kaudalen Teil des «axillären» Anteils ist eine sprunghafte Assimilation von Perichondrium costale zu Knorpelzellen vorhanden. Sie fehlt in der Infraspinalplatte und auf der ganzen Kutanseite.

Das Perichondriumblastem der Spina- und Incisuraregion enthält wie bei jüngeren Embryonen zahlreiche Gefäße und intraperichondrale Ossifikationsherde, deren Ausdehnung zwischen der beim vorangehenden und der beim folgenden Embryo liegt.

Der *Embryo E9* hat auf mittlerer Höhe der Supraspinalplatte an der Grenze des vertebralen Viertels beidseits eine Grube, ein Schlitz ist jedoch nicht vorhanden. Die auf der Kostalseite der Scapulaplatte kranio-kaudal verlaufende Rinne vertebral von der Collumregion wird kranial durch intraperichondrale Ossifikationsherde teilweise aufgefüllt. An die dick aufgetriebene Infraspinalplatte schließt sich vertebralwärts eine dünne, nach kostal abgewinkelte Leiste an, die kaudalwärts vorerst breiter wird und dann auf mittlerer Höhe bis zum Verschwinden abnimmt.

Das Reifezentrum im Stadium V ist ausgedehnt. Stellenweise finden sich zusammenhängende intraperichondral ossifizierende Gebiete und dünne perichondrale Knochenmanschetten (Abb. 36 bis 38). Die Supraspinalplatte besteht aus einem dünnen, kleineren «vertebralen» und aus einem in seiner Mitte dick aufgetriebenen, größeren «axillären» Anteil, die auf mittlerer Höhe beinahe vonein-

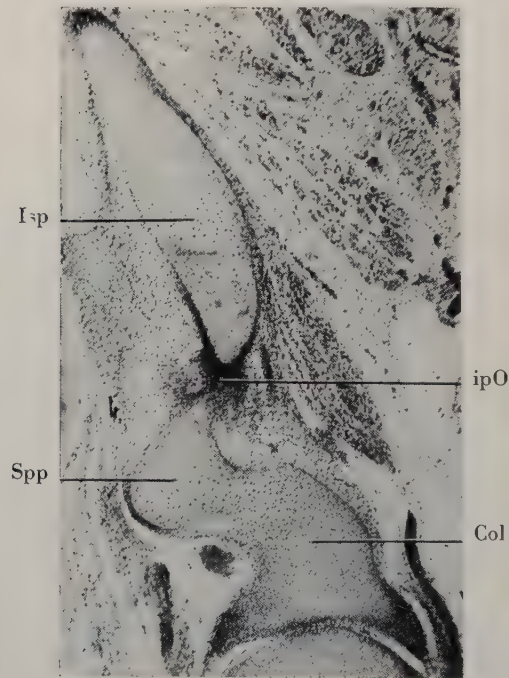


Abb. 36. Embryo E9, 30 mm SSL, quer, 7μ , Azan, Schnitt 372/1/1, Vergr. $25\times$. Schnitt durch Infraspinalplatte (Isp), Spinapfeilerwurzel (Spp) und Collumregion (Col). Im lockeren Perichondriumblastem der Incisuraregion findet sich ein zusammenhängendes intraperichondrales Ossifikationsgebiet (ipO).

ander getrennt sind; es finden sich jedoch auf allen Schnitthöhen noch wenige interponierte Knorpelzellen im Stadium A.

Beidseits der Supraspinalplatte finden sich Gebiete, in welchen mehrere Reihen von Perichondriumzellen «en bloc» zu jungen Knorpelzellen werden, wodurch die Knorpelgrenze ins Perichondrium verlegt scheint. Die Umwandlung der durch intensivere Cytoplasmafärbung abgegrenzten Perichondriumzone in Knorpel erfolgt in vertebro-axillärer Richtung. Die gleichen Vorgänge sind auch auf der Kostalseite der Infraspinalplatte weit kranial vorhanden, und zwar stets über Knorpel im Stadium I und II.

Die vertebrale Leiste an der Infraspinalplatte besteht aus jungem Knorpel, der arm an Interzellulärsubstanz ist und sich durch seine Zellanordnung vom übrigen Teil der Infraspinalplatte unterscheidet.

Das Perichondrium über der Supraspinalplatte ist größtenteils weder gegen den Knorpel noch gegenüber der Umgebung scharf abgegrenzt. Überall finden sich Übergänge von blastematösem Perichondrium zu Knorpel. Nur am axillären Ende des «axillären» Anteils ist das übliche Bild eines dünnen, dichten kostalen und eines dicken, lockeren kutanen Perichondriums vorhanden. Im zusammenhängenden Perichondriumblastem der Spina- und Incisuraregion finden sich zahlreiche Gefäße und intraperichondrale Ossifikations-

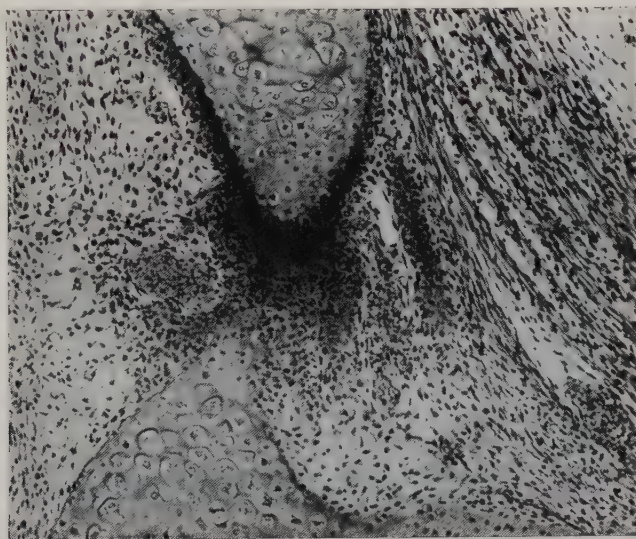


Abb. 37. Ausschnitt aus Abb. 36, im Bereich der nachmaligen Incisur. Vergr. 80 $\times$. Beachte die intraperichondralen Ossifikationsherde und die dünne perichondrale Knochenplatte auf der Kutanseite der Infraspinalplatte.

herde, die sich kranialwärts bis in den kaudalen Teil der Supraspinalplatte ausbreiten (Abb. 36 und 37). Der Winkel zwischen Spinapfeiler und Scapulaplatte ist mit intraperichondralen Ossifikationsherden ausgefüllt. Am größten sind die intraperichondralen Ossifikationsherde über der dünnsten Stelle der Scapulaplatte, vertebro-kaudal von der Spinapfeilerwurzel (Abb. 38). Das ausgedehnte Spinablastem zieht den zwei axillären Dritteln der Supraspinalplatte entlang.

Beim *Embryo E10* weist die Supraspinalplatte, die vertebral rasch an Höhe gewinnt und erst gegen die Incisuraregion wieder verliert, axillär von ihrer Mitte einen axillo-vertebral gerichteten Schlitz auf. In diesem Bereich sitzt der Supraspinalplatte eine schmale Leiste aus Knorpel im Stadium A auf. Weiter axillär ist anstelle des Schlitzes eine beidseitige Rinne auf dem Schnittbild vorhanden. Die Infraspinalplatte ist nach kutan-konvex gekrümmt wie dies auch beim Erwachsenen der Fall ist.

Der Processus coracoides zieht von der Kostalfläche der nicht stark ausgebildeten Collumregion nach kostal und ventral. Er besitzt einen nach vertebral gerichteten Knorpelsporn, an dem sich das Lig. transversum festsetzt. Der Spinapfeiler ist mächtig ausgebildet. Er setzt sich apikalwärts in das große knorpelige Acromion fort. An seiner Krümmung geht nach vertebral ein großer Knorpelsporn ins

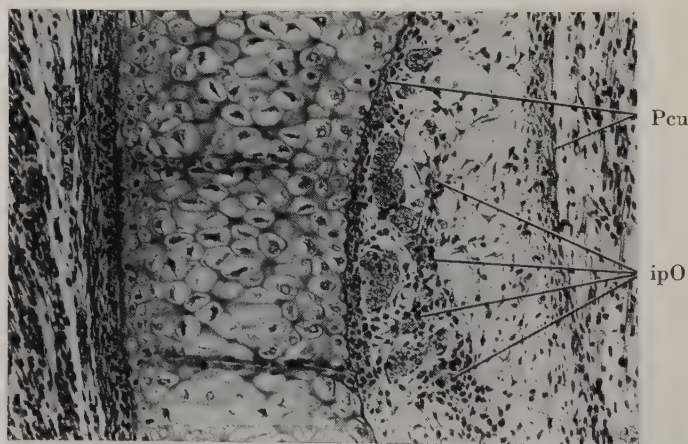


Abb. 38. Gleicher Embryo wie Abb. 36, Schnitt 378/3/1, Vergr. 100 $\times$. Schnitt durch die dünnste Stelle der Infraspinalplatte. Man beachte die Unterschiede in Dicke und Struktur zwischen dem kostalen und dem kutanen Perichondrium (Pcu), in dessen lockerer Innenschicht große Gefäße und intraperichondrale Ossifikationsherde (ipO) zu sehen sind. Wohl liegen Osteoblasten der kutanen Knorpelfläche an, aber eine perichondrale Knochenplatte fehlt.

anschließende Spinablastem ab, das sich bis fast zum Angulus vertebralis verfolgen läßt. Auf der Spinawurzel sitzt axillärwärts eine intraperichondral ossifizierende Knochenleiste.

In der Supraspinalplatte sind die Grenzen der vier Anteile fast vollständig verwischt. Als einziges Anzeichen der uneinheitlichen Entwicklung ist ein Schlitz zwischen dem kosto-axillären (oder intermediären?) und dem darunterliegenden axillären Anteil zu erkennen (Abb. 39). An der Bildung der Knorpelspanne kranial des Schlitzes ist vermutlich das axilläre Ende des intermediären und das vertebrale Ende des kosto-axillären Anteils beteiligt.

Auf der Kostalseite der Infraspinalplatte, des Spinapfeilers und des Acromions ist an die älteren Stadien ein verschieden dicker Saum junger Knorpelzellen apponiert.

Kalknachweis nach Kossa: Es sind nirgends Calciumverbindungen nachweisbar. In der Knorpelinterzellulärsubstanz ist gegen kostal eine zunehmende Anzahl dunkler Granula eingelagert. Die Grenze zum Perichondrium ist überall scharf zu erkennen. Das Perichondrium costale hat Zellen mit dichtstehenden, braunroten Ker-

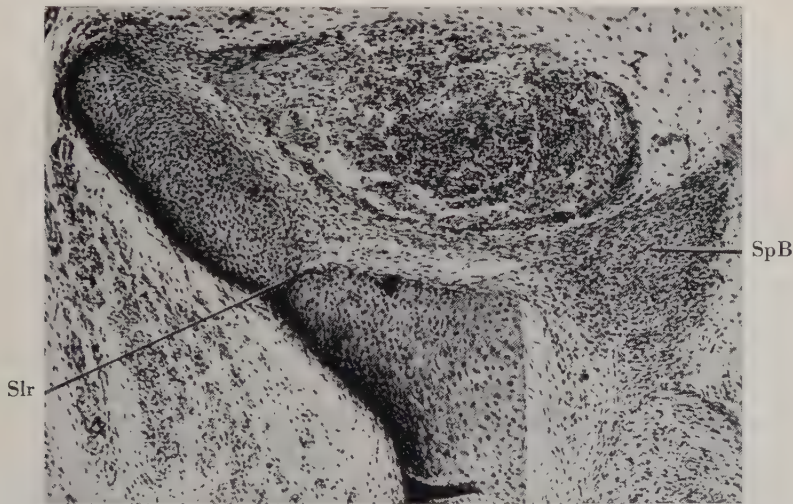


Abb. 39. Embryo E10, 31 mm SSL, frontal, 8 μ , Kalknachweis nach Kossa, Schnitt 3b/1/4, Vergr. 65 $\times$. Schnitt durch den kranialen Teil der Scapula. Kranio-kutan ist im lockeren Perichondriumblastem der Kutanseite das Spinablastem (SpB) zu sehen. Man beachte die Schlitzregion (Slr) mit einem Perichondriumüberzug der begrenzenden Knorpelteile und den völlig negativen Ausfall des Kalknachweises in der Interzellulärsubstanz (die ganze Kostalseite des Knorpels und des Perichondriums sind stärker gefärbt, aber nicht Kossa-positiv).

nen und gelbem Cytoplasma, wodurch es auf Schnitten als hellaufleuchtendes Band erscheint; dagegen ist das kutane Perichondrium blaß. Die Kerne des Spinablastems und des Lig.transversum sind intensiver gefärbt als die des umgebenden Perichondriumblastems.

PAS-Reaktion: In der Knorpelinterzellulärsubstanz der Stadien A bis I sind wie bei den Embryonen B 7, C 5 und D 3 auf der Kostalseite PAS-positive Granula im Zwischenkernraum eingelagert. In den drei jüngsten Stadien (A bis I) ist die Interzellulärsubstanz auf der Kostalseite stärker gefärbt als kutan, in den älteren Stadien ist sie auf dem ganzen Schnitt gleichmäßig stärker gefärbt. Das Cytoplasma der Knorpelzellen zeigt wie bei den Embryonen D 3 und E 5 mit zunehmender Reife eine stärkere Färbbarkeit.

Im Spinablastem sind wie beim Embryo D 3 zwischen den Kernen PAS-positive Granula eingelagert.

Die Interzellulärsubstanz der Ossifikationsherde färbt sich mit der gleichen Dichte wie die des reifen Knorpels, ihr Farbton ist jedoch eher grau anstatt lila.

Faserdarstellung nach Gomori: In der Knorpelinterzellulärsubstanz sind auf der Kostalseite feine dunkle Netzstrukturen vorhanden. Das kostale Perichondrium erscheint durch die Häufung von dichtgelagerten Fasern als schmales dunkles Band, demgegenüber das kutane mit seinen weitauseinanderliegenden Fasern blaß erscheint. Im Spinablastem sind gehäuft – vorwiegend argyrophile – Fasern sichtbar.

Das Cytoplasma der Osteoblasten, resp. der Osteocyten enthält gehäuft dunkle Granula, die in den Knorpelzellen nicht sichtbar sind.

Alcianblau-Reaktion: Die Knorpelinterzellulärsubstanz zeigt je nach Lokalisation und Reife eine sehr verschiedene Färbbarkeit. Auf der Kutanseite entspricht sie der zunehmenden Knorpelreife. Nahe am Margo vertebralis und im kosto-axillären Supraspinalplattenanteil ist die Färbung kostal deutlich stärker als kutan. Ihre Ausdehnung entspricht der des subperichondral-kostalen Saumes, der sich beim Embryo C 5 färberisch gleich und beim Embryo E 5 gerade gegenteilig verhält. Im übrigen Teil der Kostalseite ist die Interzellulärsubstanz mit Ausnahme der Knorpelhöhlenwände blasser als kutan. Das Cytoplasma der Knorpelzellen ist im Stadium II am stärksten Alcian-positiv.

Das Alcian-negative Perichondrium ist auf der Kostalseite dünn und dicht, kutan dick und locker. Mit Ausnahme der blastematösen Ränder ist es gegen die Umgebung gut abgrenzbar.

Das Spinablastem besteht aus polymorphkernigen Zellen mit leicht Alcian-positivem Cytoplasma.

MP-Reaktion: Die Interzellulärsubstanz zeigt wie bei allen jüngeren Embryonen mit zunehmender Knorpelreife eine stärkere metachromatische Reaktion, die zudem auf der ganzen Kostalseite stärker ist als kutan, was auch für die Embryonen C 7, C 12 und E 11 zutrifft. Diese kostal gelegene Zone schließt im Gegensatz zu den Verhältnissen beim Embryo E 5 auch den subperichondral-kostalen Saum mit jungen Knorpelzellen ein, deren Cytoplasma auffallend stark rot gefärbt ist.

Die Zellen des Spinablastems haben ein deutlich rot gefärbtes Cytoplasma, das auch im blastematösen Perichondrium der Randgebiete zu beobachten ist.

Der Embryo E 11 zeigt keine wesentlichen Unterschiede zum vorhergehenden. Einzig die *Glykogen-Färbung* zeigt erwähnenswerte Befunde. In der vertebrealen Hälfte der Scapulaplatte ist die Glykogen-positive Reaktion der Knorpelinterzellulärsubstanz gegen die Kostalseite hin stärker als kutan. In der axillären Hälfte fehlt dieser kostal-kutane Unterschied. Das Cytoplasma der Knorpelzellen zeigt keine regelmäßige Verteilung seiner Färbbarkeit.

Das Perichondrium cutaneum, das Spinablastem und die Incisuraregion enthalten keine Glykogen-positiven Granula im Zwischenkernraum.

Ergebnisse und Diskussion

Die Funktionen und Eigenschaften des Perichondriums (resp. des Skeletblastems) unterscheiden die Frühentwicklung der menschlichen Scapula in wesentlichen Punkten von der eines langen Röhrenknochens vom Typus des Humerus.

Beim Humerus entwickelt sich im Skeletblastem schon früh einerseits eine Knorpelanlage, deren Form im wesentlichen nur in den Proportionen vom Adultzustand abweicht (vgl. *Streeter* [1949]), anderseits ein hautartiger Perichondriumüberzug, der bis zu einem bestimmten Zeitpunkt Chondroblasten und danach – je nach Lokalisation früher oder später – Osteoblasten bildet. Dabei verändert der Perichondriumüberzug die Form des wachsenden Skeletstückes nicht prinzipiell, auch wenn er nach *Streeter* [1949] dessen Formgebung zur Hauptsache reguliert.

Bei der Scapula liegen die Verhältnisse komplizierter. Wohl wird im Skeletblastem ebenfalls eine primäre Knorpelanlage gebildet; sie stellt aber nur die Anlage eines Teils der adulten Scapulaform dar, während auch die Anlage des restlichen Teils noch gebildet werden muß. Der bei der primären Knorpelbildung übriggebliebene An-

teil des Skeletblastems wird zu einem pluripotenten Perichondriumblastem, das die Knorpelanlage nur stellenweise hautartig überzieht und an bestimmten Stellen eine eigene Form annimmt. Die Form der knöchernen Scapula wird schon relativ früh durch das Perichondriumblastem vorgezeichnet, dem somit eine wesentliche Funktion bei ihrer Ausbildung zukommt. Erst durch die sekundäre Ausdifferenzierung des Perichondriumblastems, bei der gleichzeitig Chondro- und Osteoblasten in enger Nachbarschaft gebildet werden, erreicht die in diesem Stadium aus Knorpel- und Knochengewebe bestehende Scapulaanlage die prinzipiell gleiche Form wie die adulte Scapula.

Der Aufbau einer dem Adultzustand ähnlichen Form vollzieht sich beim Humerus allein durch intussuszeptionelles und appositionelles Knorpelwachstum bis zum Ossifikationsbeginn, während die Scapula dazu noch zwei weitere Entwicklungsschritte durchläuft: Die von der Knorpelanlage örtlich unabhängige Formbildung des Perichondriumblastems vor und dessen Umbildung in Knorpel- und Knochengewebe nach Ossifikationsbeginn. Es ist beizufügen, daß die drei Vorgänge nicht streng nacheinander, sondern mit zeitlichen Überschneidungen ablaufen.

Nicht nur die Entstehung der Form, auch die Histogenese der Scapula weist Besonderheiten gegenüber der des Humerus auf. Während bei der Chondrogenese im Humerus kein Sektor seines Umfangs eine erhöhte Aktivität zeigt, findet bei der Scapula auf der Kostalseite ein erhöhter Anbau statt, mit dem auch Unterschiede im Bau des Perichondriums zusammenhängen. Auch konnten wir bei der Scapula zwei Arten einer schubartig auftretenden Knorpelbildung beobachten, die beim Humerus nicht zu finden waren.

Auf Grund unserer Befunde können wir die Frühentwicklung der Scapula tabellarisch wie folgt zusammenfassen (s. Tabelle III).

Bei der *Gruppe A* sind im scapulo-humeralen Blastem nur die blastematösen Anlagen von Scapulaplatte und Spinapfeiler zu erkennen, alle anderen Teile fehlen. *Lewis* [1901] beschreibt die Scapulaanlage bei einem Embryo von 9 mm SSL als viereckige Masse von Blastemzellen und erwähnt das Fehlen von Processus coracoides, Acromion und Spina. *Hochstetter* [1952] hat bei einem 10,4-mm-Embryo ein Scapulablastem beobachtet, das er als Spinablastem deutet (s. unten). Nach *Olivier* [1962] erscheint die Scapulaplatte ungefähr beim 10-mm-Stadium, der Spinapfeiler jedoch erst später.

Schon beim ersten Embryo der *Gruppe B* ist ein beträchtlicher Teil der Scapula knorpelig. *Lewis* [1901] beobachtete bei einem

Table III. Tabellarische Übersicht der Frühentwicklung der Scapula

Gruppe	Supraspinalplatte (Sspl.)	Infraspinalplatte (Ispl.)	Spinapfeiler	Acromion	Processus coracoides	Perichondrium Schichten	Gefäße	Ossif.	Spina (außer Spinapfeiler)
A	Sspl. Ispl. blastematös	kaum entwickelt blastematös	groß blastematös	fehlt	fehlt eventuell vorhanden	Perichondrium angedeutet			fehlt
B	Sspl.: Ispl. wie 1:3 4 Anteile Blastem bis Stad. I	kostal-konvexe Krümmung max. in Stad. I	groß	klein	sehr groß v. a. Stad. B	1schichtig kosto-kutane Unterschiede			Spinablastem über axill. Hälfte der Scapulaplatte
C	Sspl.: Ispl. wie 1:3 2-3 Anteile Schlitz inkonstant Stad. A-III	inkonst. kostal- konvexe Krümmung vereinzelt subp.- kost. Saum max. in Stad. III	groß Sporn inkonstant Stad. III-A	groß	groß v. a. Stad. I	kostal 1schichtig kutan über Stad. II + III 2schichtig			Spinablastem reicht weiter vertebral- wärts als bei Gruppe B
D	Sspl.: Ispl. wie 1:4 Anteile kaum erkennbar Schlitz oder Rinne Stad. A-IV	geringe kostal- konvexe Krümmung inkonst. subp.- kost. Saum max. Stad. IV	groß Sporn inkonstant Stad. IV-B	groß	rel. klein	kostal 1schichtig kutan über Stad. II-IV 2schichtig	spärlich im Per- blastem		Spinablastem beginnt nahe am Margo vertebralis
E	Scapulaplatte im Verh. zu Collumregion und Processus coracoides groß Sspl.: Ispl.höhe variiert stark Anteile nicht oder nur angedeutet abgrenzbar Schlitz, Rinne oder nichts kut. und kost. Assimil.	zu Collumregion und z. T. sehr groß und dünn kutan-konvexe Kr. bei reifsten Embr. inkonst. subp.- kost. Saum z. T. Assimilation max. in Stad. V	sehr groß Sporn inkonstant	groß	rel. klein	kostal über Stad. V 2schichtig kutan über Stad. II-V 2schichtig	reichl. do. kut. kost.		

11-mm-Embryo, *Gardner und Gray* [1953] sahen bei einem 12-mm-Embryo eine hauptsächlich «vorknorpelige» Scapula, wobei der «Vorknorpel» etwa unsern Knorpelstadien A bis I entsprechen dürfte. Die beiden letztgenannten Autoren haben aber auch bei einem 12,5-mm-Embryo noch eine mit Ausnahme der Collumregion blastematische Scapula gesehen. Nach der Beschreibung von *Olivier* [1962] erscheint im 17-mm-Stadium ein Knorpelkern in der mesenchymatösen Scapulaplatte, während *Hochstetter* [1952] schon bei einem 15,3-mm-Embryo eine «zum großen Teil aus Knorpelgewebe» bestehende Scapula und bei drei Embryonen von 16,8–18,3 mm SSL eine «zum größten Teil» knorpelige Scapula festgestellt hat. *Andersen* [1963] hat bereits bei einem 12-mm-Embryo Knorpel im Stadium II–III gefunden; wir dagegen erstmals bei einem Embryo von 18 mm SSL. Das Auftreten von Knorpel in Stadium II–III bei der Scapula eines 12-mm-Embryos ist auch unter Berücksichtigung der schlechten Übereinstimmung von Scheitel-Steißlänge und Reife als ausnahmsweise früh zu betrachten.

Es ist eine aus vier Anteilen bestehende, teilweise knorpelige Supraspinalplatte vorhanden, die bei der adulten Scapula allerdings nur ihrem vertebralen Teil entspricht. Über das Vorhandensein einer Supraspinalplatte auf dieser Entwicklungsstufe herrscht in der Literatur keine einheitliche Meinung. In den Darstellungen von *Hagen* [1900], *Fawcett* [1910], *Rutherford* [1914], *Dijkstra* [1923], *Subkowitsch* [1931] und *Ciardi-Dupré* [1942] ist sie deutlich vorhanden, *Lewis* [1901], *Bardeen* [1910] und *Olivier* [1962] äußern sich vorsichtig und *Zawisch* [1954] betont ihr fast gänzlich Fehlen. Da wir bereits bei einem Embryo von 13 mm SSL ein Blastem über der axillären Hälfte der Scapulaplatte als Spinaanlage identifizieren konnten, wodurch eine genaue Höhenlokalisation möglich wird, zweifeln wir nicht an der Existenz einer deutlich ausgeprägten Supraspinalplatte schon in diesem Stadium der Entwicklung. Zudem ist auf der Höhe des Spinablastems eine der Orientierung dienende Kante auf der Kutanseite der Scapulaplatte vorhanden, die durch das stumpfwinklige Aufeinandertreffen von Supra- und Infraspinalplatte zustande kommt.

Die Angaben über das erste Auftreten einer Spinaanlage variieren stark. *Hochstetter* [1952] hat, wie oben erwähnt, bei einem 10,4-mm-Embryo ein Spinablastem gesehen und *Olivier* [1962] gibt an, der Spinapfeiler erscheine erstmals beim 12-mm-Stadium. Dagegen berichten *Gardner und Gray* [1953], die Spina trete zum ersten Mal

bei einem 20-mm-Embryo auf. *Lewis* [1901] beobachtet bei einem 16-mm-Embryo eine laterale Lippe des Margo anterior (cranialis), von der er vermutet, sie stelle die Spina dar. *Hagen* [1900] und *Fawcett* [1910] erwähnen bei zwei Embryonen von 17 und 19 mm SSL, die Spina fehle fast vollständig und sei nur als leichte Auftreibung nachweisbar. *Rutherford* [1914] stellt zwar das vollständige Fehlen der Spina bei einem 20-mm-Embryo fest, beschreibt aber beim gleichen Embryo die kutane Kante zwischen Supra- und Infraspinalplatte als zukünftige Spinawurzel. Nach *Dijkstra* [1923] und *Zawisch* [1954] fehlt von der Spina noch jede Spur, während *Andersen* [1963] beim 20-mm-Stadium von einer deutlich hyalinen Spina berichtet.

Die in zwei Ebenen kostal-konvex gekrümmte Infraspinalplatte ist gegenüber der Supraspinalplatte im Vergleich mit der Gruppe A viel stärker gewachsen. Auch *Zawisch* [1954] hat bei einem 20-mm-Embryo eine kostal-konvexe Krümmung der Infraspinalplatte (in einer Ebene) festgestellt und auf das gegenteilige Verhalten bei der adulten Scapula hingewiesen. *Olivier* [1962] bezeichnet sie dagegen beim 12-mm-Stadium als «légèrement convexe (comme chez l'adulte)» und fährt dann fort «alors qu'elle est anormalement concave à 13, 17, 21 et 26 mm», wobei aus dem Text nicht hervorgeht, ob eine Abnormität gegenüber der Form anderer embryonaler Scapulae oder gegenüber dem Adultzustand gemeint ist.

Der große knorpelige Spinapfeiler geht kontinuierlich in ein kleines Acromion über (in Übereinstimmung mit *Hagen* [1900], *Lewis* [1901] und *Gardner* und *Gray* [1953]), das ganz blastematös ist. *Olivier* [1962] betont, er habe das Acromion erst beim 17-mm-Stadium auftreten gesehen, während wir bei der ganzen Gruppe B ein blastematöses Acromion gefunden haben. Ein Vergleich mit den anderen Autoren ist unmöglich, da diese für Spinapfeiler und Acromion nur einen Ausdruck verwenden (s. Tabelle I).

Der Processus coracoides ist sehr groß und besteht hauptsächlich aus jungem Knorpel. Über seine im Verhältnis zur Scapulaplatte enorme Größe besteht in der Literatur Einstimmigkeit (*Hagen* [1900], *Braus* [1906], *Rutherford* [1914], *Dijkstra* [1923], *Subkowitsch* [1931], *Gardner* und *Gray* [1953], *Olivier* [1962], *Andersen* [1963]).

Das einschichtige Perichondrium weist kosto-kutane Differenzen auf. Dem Perichondrium wird in der ganzen Scapulaliteratur wenig Beachtung geschenkt. Einzig *Lewis* [1901] weist schon bei einem 11-mm-Embryo auf die kosto-kutanen Unterschiede im Perichondrium hin.

Bei der *Gruppe C* läßt die mit Ausnahme der Ränder knorpelige Supraspinalplatte nur zwei bis drei Anteile erkennen. In ihrer Mitte findet sich bei der Mehrzahl der Embryonen eine Schlitzbildung, die auch von *Rutherford* [1914], *Frey* [1919], *Dijkstra* [1923], *Ciardi-Dupré* [1942], *Zawisch* [1954] und *Olivier* [1962] beobachtet wurde.

Im Unterschied zur vorhergehenden Gruppe fehlt die kostalkonvexe Krümmung der Infraspinalplatte bei mehreren Embryonen. Vereinzelt findet man schon hier einen subperichondral-kostalen Saum.

Vom großen, knorpeligen Spinapfeiler geht ein vertebralwärts gerichteter Knorpelsporn ab, der auf dem Scapulamodell eines 20-mm-Embryos von *Rutherford* [1914] angedeutet ist. Er stellt das axilläre Ende der nachmaligen Spinaleiste dar und setzt sich kontinuierlich ins vertebral anschließende Spinablastem fort.

Das Acromion ist größer als bei der vorhergehenden Gruppe. Diese Größenzunahme hat auch *Lewis* [1901] festgestellt. Es besteht nur noch ganz apikal aus Blastemzellen.

Da die Scapulaplatte gegenüber der vorhergehenden Gruppe nur wenig verändert ist, scheint der hauptsächlich aus Knorpel im Stadium I bestehende Processus coracoides immer noch relativ groß, was auch *Lewis* [1901] und *Rutherford* [1914] bemerken.

Das Perichondrium costale ist einschichtig, während das kutane über Knorpel in den Stadien II und III zwei Schichten zeigt.

Bei der *Gruppe D* besteht die Scapula mit Ausnahme von Teilen der Ränder und der Spina, sowie des später entstehenden axillären Abschnittes der Supraspinalplatte, ganz aus Knorpel, was für diese Entwicklungsstufe auch *Zawisch* [1954] vermerkt.

In der Supraspinalplatte sind die einzelnen Anteile schwer abzugrenzen. An die Stelle des Schlitzes können beidseitige Rinnen treten (vgl. *Dijkstra* [1923]). Die stärker als die Supraspinalplatte gewachsene Infraspinalplatte hat nur eine geringe kostalkonvexe Krümmung. Der subperichondral-kostale Saum ist vereinzelt vorhanden.

Das nunmehr ganz knorpelige Acromion ist immer noch relativ groß, während der Processus coracoides mit dem Wachstum der Scapulaplatte nicht Schritt gehalten hat und nun relativ kleiner scheint. Diese relative Größenabnahme haben auch *Dijkstra* [1923] und *Olivier* [1962] beschrieben.

Das Perichondrium hat sich gegenüber der vorhergehenden Gruppe kaum verändert, abgesehen vom Auftreten spärlicher Gefäß-

einlagerungen im Perichondriumblastem der Incisuraregion; diese haben *Gardner* und *Gray* [1953] und *Andersen* [1963] schon bei Embryonen von 22 und 23 mm SSL beobachtet. In Übereinstimmung mit unseren Befunden gibt *Zawisch* [1954] das Auftreten von Gefäßeinlagerungen bei einem 25-mm-Embryo an.

Die Scapulaplatte hat bei den meisten Embryonen der *Gruppe E* im Verhältnis zur Collumregion und zum Processus coracoides auffallend stark an Größe gewonnen. Es tritt erstmals Knorpel im reifsten Stadium in der Scapula auf, was *Andersen* [1963] bei Embryonen von 26 mm SSL namentlich erwähnt. Das Verhältnis der Höhe von Supra- zu Infraspinalplatte variiert innerhalb dieser Gruppe stark. Die Supraspinalplatte ist grotesk geformt, wie schon von *Ciardi-Dupré* [1942] bei Embryonen dieser Entwicklungsstufe vermerkt wurde. In der Schlitzregion sind alle Übergänge der Trennung vorhanden. Die verschiedenen Anteile sind nicht oder nur andeutungsweise abzugrenzen (vgl. *Ciardi-Dupré* [1942]). Auf der Kutan- und Kostalseite ist bei mehreren Embryonen eine Assimilation «en bloc» von Perichondrium zu Knorpelzellen vorhanden.

Die Infraspinalplatte ist teilweise sehr groß und dünn und zeigt bei den reifsten Embryonen eine kutan-konvexe Krümmung wie beim Erwachsenen. Nicht bei allen Embryonen finden sich stellenweise ein subperichondral-kostaler Saum und eine Assimilation «en bloc».

Das Perichondrium ist kostal über Stadium V, kutan über den Stadien II bis V zweischichtig. Im Perichondriumblastem finden sich reichlich Gefäße (übereinstimmend mit *Gardner* und *Gray* [1953], *Andersen* [1963]) und – kutan mehr als kostal – intraperichondrale Ossifikationsherde.

Die Frühentwicklung einzelner Scapulateile

Supraspinalplatte

Während die Supraspinalplatte bei unserem Embryo A1 als ein einheitliches Blastem erscheint, sind in ihr bei der Gruppe B vier auf verschiedene Weise zusammenhängende Gruppierungen von Zellen zu unterscheiden. Kaudal sind an ihrem Aufbau der große axilläre Anteil, der gleichsam als supraspinal gelegener kranialster Teil der Infraspinalplatte deren Knorpelreifeverteilung aufweist, und der kleine blastematöse vertebrale Anteil beteiligt. Kranial sitzen auf deren Grenzzone der kugelige, aus zwiebelschalenartig angeordneten

Blastemzellen bestehende intermediäre und der kosto-axilläre Anteil, der auf die kutan-axilläre Ecke des axillären Anteils aufgesetzt ist. Schon bei den reiferen Embryonen derselben Gruppe verändert sich das Bild der beiden kranialen Anteile. Zuerst vergrößert sich der kosto-axilläre Anteil beträchtlich in kranialer Richtung und danach wächst der intermediäre Anteil über den axillären hin zu einem birnförmigen Gebilde aus, dessen axilläres Ende an den kosto-axillären Anteil Anschluß gewinnt. Bemerkenswert ist dabei, daß zwei Anteile der Knorpelreifeverteilung in der Infraspinalplatte nicht folgen: Der vertebrale ist kranial knorpelig, kaudal aber blastematös, und der intermediäre ist vertebro-kranial am reifsten. Die Regelmäßigkeit dieses Verhaltens bei verschiedenen Embryonen läßt daran denken, daß diese Anteile ehemals selbständige Bildungen gewesen sein könnten (vgl. *Rutherford* [1914]).

Bei der Gruppe C, wie auch bei den beiden reifsten Gruppen D und E, spielen sich nebeneinander Vorgänge der Verschmelzung und der Trennung zwischen Anteilen der Supraspinalplatte ab, deren Verlauf nach unseren Beobachtungen weder topographisch noch zeitlich einheitlich ist. Während bei der Gruppe B fast überall vier durch Blastemzellen (resp. deren Anordnung) getrennte Anteile zu finden sind, verschwinden bei den folgenden Gruppen mit zunehmender Reife die trennenden Blastemzellen zwischen den einzelnen Anteilen und an der Grenze gegen die Infraspinalplatte. In der Folge können die Anteile zuerst nur durch die Interposition von unreiferem Knorpelgewebe und später, nach dem Ausgleich der Knorpelreife, nur noch am verschiedenen Verlauf der Knorpelzellreihen unterschieden werden. Dieser Verschmelzungsvorgang durch Ausgleich der Knorpelreife scheint im allgemeinen kaudal zu beginnen und kranialwärts fortzuschreiten. Er kann mit Hilfe der histochemischen Reaktionen verdeutlicht werden. Bei einigen Embryonen der Gruppe C findet er zuerst einerseits zwischen dem vertebralen und dem intermediären Anteil und anderseits zwischen dessen vertebralem Ende und der Infraspinalplatte statt. Später verschmilzt auch das axilläre Ende des kosto-axillären Anteils mit dem axillären Anteil.

Bei der Mehrzahl der Scapulae bleiben die Blastemzellen am längsten kaudal vom axillären Ende des intermediären und vom vertebralen Ende des kosto-axillären Anteils erhalten. An dieser Stelle finden sich bei Embryonen der Gruppen C bis E verschiedene Grade der Diskontinuität im Knorpelgewebe. Diese kann in einem vertebro-axillär gerichteten Schlitz mit gut ausgebildetem Perichon-

driumüberzug der randbildenden Knorpelteile, in einem Schlitz mit eingeschobenen ungeordneten Blastemzellen, in einer Interposition unreiferen Knorpels oder in einem verschiedenen Verlauf der Knorpelzellreihen bestehen. Als letzte Andeutung einer uneinheitlichen Entwicklung können in der Schlitzregion schließlich beidseitige vertebro-axillär verlaufende Rinnen beobachtet werden. Ein Schlitz mit eigenem Perichondrium der begrenzenden Knorpelteile ist also nur die auffälligste Erscheinung eines verzögerten Ausgleichs der Knorpelreife, im allgemeinen zwischen den beiden genannten kranialen Anteilen und dem darunterliegenden axillären Anteil. Wir halten daher das inkonstante Auftreten einer Schlitzbildung während der Supraspinalplattenentwicklung nur für eine sinnfällige Erscheinung der Verschmelzungsvorgänge, ohne dem Schlitz einen eigenständigen Charakter beizumessen.

Ciardi-Dupré [1942] hat – unseres Wissens als einziger Autor – die Frühentwicklung der Supraspinalplatte vom 21-mm-Stadium an formal und histologisch beschrieben. Seine Angaben stützen sich auf die Untersuchung von 14 Embryonen mit 21–34 mm SSL, die altersmäßig unseren Gruppen C bis E entsprechen. Er hat bei vier Embryonen von 21 bis 24 mm SSL zwei Anteile in der Supraspinalplatte gefunden, bei etwas größeren drei und bei denen über 26 mm SSL vorwiegend eine einheitliche Platte, Angaben, die unter Berücksichtigung der großen Variabilität den unsrigen nicht widersprechen. Er versucht, ausgehend von einer nach der SSL geordneten Embryonenreihe, eine Entwicklungslinie im Verhalten der einzelnen Supraspinalplattenanteile zu erkennen, was nach unseren Beobachtungen an 27 Embryonen der gleichen Längen nicht möglich ist. So interpretiert er das Vorhandensein eines dritten Anteils, den er bei jüngeren Embryonen nicht gesehen hat, als ein neues Ereignis, während wir eine noch nicht eingetretene Verschmelzung annehmen würden; denn wir vertreten die Ansicht, daß die in einem früheren Zeitpunkt bei allen Embryonen vorhandenen vier Supraspinalplattenanteile mit verschiedener Geschwindigkeit und in verschiedener Kombination miteinander verschmelzen. Sein «posteriorer» Anteil ist mit unserem vertebrealen zu identifizieren, wogegen seine Lageangaben über die beiden anderen Anteile zur Identifikation nicht ausreichen. Auch die genaue Lage der von ihm beschriebenen Schlitzbildungen ist nicht ersichtlich. Seine Beschreibung des allgemeinen Vorgangs der Verschmelzung stimmt mit unseren Angaben überein. Während derselbe Autor ebenso wie wir annimmt, die embryonale Supraspinalplatte

entspreche zumindest einem Teil der adulten, schreibt *Olivier* [1962] über den «bord supérieur»: «Il présente une forme transitoire et mystérieuse» und fragt sich, ob der embryonale «bord supérieur» überhaupt der Supraspinalplatte des adulten Schulterblattes entspreche, ohne sich jedoch auf eine Antwort festzulegen.

Bei *Rutherford* [1914] haben wir die erste Beschreibung der Schlitzbildung in der Supraspinalplatte gefunden. Er berichtet über die Verhältnisse bei einem 20-mm-Embryo: «There is present a distinct supraspinous element, separated by a slight interval near the middle of its length from the main part of the blade ...». Da er bei einem 30-mm-Embryo einen größeren Schlitz findet, schließt er daraus, der Schlitz sei größer geworden. Diese Folgerung ist unzulässig, da mindestens ebenso viele Embryonen gleicher Länge überhaupt keinen Schlitz aufweisen. Das inkonstante und gleichsam beiläufige Auftreten eines Schlitzes lassen seinen Vergleich mit der Schlitzbildung in der Scapula von Cetaceen fragwürdig erscheinen. *Frey* [1919] beschreibt eine Lücke nahe am Oberrand der Scapula bei einem 30-mm-Embryo und macht histologische Angaben, die sich mit unseren decken. Auch *Dijkstra* [1923] hat sich mit der Schlitzbildung beschäftigt. Er spricht von einem inkonstanten, mit Bindegewebe gefüllten Foramen, dessen Form individuell stark wechselt, und an dessen Stelle auch nur eine Fovea vorhanden sein kann. Er fand bei 11 von 18 Embryonen mit Scheitel-Steißlängen zwischen 12 und 120 mm, wovon 9 mit einer SSL zwischen 16 und 27 mm, ein Foramen oder eine tiefe Fovea unter dem Angulus superior. Seine Darstellung des Schlitzes entspricht der unsrigen.

Infraspinalplatte

Die Infraspinalplatte weist im Unterschied zur Supraspinalplatte nur in ihrer formalen Entwicklung eine große Variabilität auf, während die Histogenese mit Ausnahme der Randzonen weitgehend einheitlich vor sich geht.

Beim Embryo A1 ist die blastematöse Anlage der Infraspinalplatte gegenüber der Supraspinalplatte verschwindend klein. Die jüngste Infraspinalplatte der Gruppe B ist eine annähernd dreieckige, schmale, kurze Platte, die nur kranial dick und in zwei Ebenen kostalkonvex gekrümmt, kaudal jedoch dünn und eben ist. Sie ist auf der kostalen Hälfte der Collumregion so aufgesetzt, daß zwischen diesen beiden Teilen eine kranio-kaudal verlaufende Rinne entsteht. Die Größenzunahme ist bei den Gruppen B und C gering. Erst bei den

Gruppen D und E ist sie bei der Mehrzahl der Embryonen deutlich vorhanden. Regelmäßig tritt eine Verdickung des Angulus caudalis auf, die bei den reifsten Gruppen, D und E, wieder weniger stark ausgeprägt ist. Die kostal-konvexe Krümmung geht bei den reiferen Embryonen mehr und mehr verloren, ist jedoch auch in der Gruppe E noch vereinzelt anzutreffen. Bei den reifsten Embryonen findet sich eine kutan-konvexe Krümmung wie bei der adulten Scapula. Bei der Gruppe B ist eine nach kutan gerichtete Abwinkelung des axillären Drittels der Infraspinalplatte vorhanden, die bei fast allen reiferen Embryonen verschwindet. Diese Abwinkelung führt zu der von *Andersen* [1963] beim 12-mm-Stadium beschriebenen S-Form auf Horizontalschnitten. Bei mehreren Scapulae der Gruppen C bis E fällt am Margo vertebralis der Infraspinalplatte kranial eine verschieden ausgebildete Leiste aus jüngerem Gewebe auf, die in manchen Fällen eine kaudale Fortsetzung des vertebralen Supraspinalplattenanteils darstellt.

Der Winkel zwischen Supra- und Infraspinalplatte ist bei den jüngeren Embryonen nur axillär, bei den älteren auch vertebral ausgebildet. *Dijkstra* [1923] hat diesen Winkel erstmals bei einem 25-mm-Embryo beobachtet und weist darauf hin, daß diese Abwinkelung bei seinem 16-mm-Embryo noch nicht existiere.

Zawisch [1954] beschreibt die Infraspinalplatte bei einem 20-mm-Embryo als dreiseitige Knorpelplatte mit einer leicht konkaven kutanen und einer leicht konvexen kostalen Fläche, wogegen *Hagen* [1900] ihre Innenfläche als «schon jetzt leicht konkav» bezeichnet, was ebensowenig zutrifft wie die summarischen Feststellungen von *Dijkstra* [1923] und *Andersen* [1963], die Scapulaform stimme im allgemeinen mit der beim Erwachsenen überein. *Olivier* [1962] fand gleichviele viereckige wie dreieckige Infraspinalplatten.

Mit Ausnahme der subperichondralen Säume und der Randgebiete zeigt die Infraspinalplatte bei den Gruppen B bis E ein einheitliches histologisches Bild, bei dem mit fortschreitender Entwicklung wohl reifere Knorpelstadien auftreten, die Reifeverteilung jedoch gleich bleibt. Um ein Reifezentrum in der Spinapfeilerwurzel sind konzentrische Zonen gleicher Reife gelegt, deren Breite gegen die Collumregion hin am geringsten ist.

Zawisch [1954] macht für Embryonen von 20 mm und mehr SSL, *Frey* [1919] für einen 30-mm-Embryo mit unserer Darstellung übereinstimmende Angaben. Ohne sich zur weiteren Reifeverteilung zu äußern, lokalisieren *Gardner* und *Gray* [1953] das Reifezentrum

beim 23-mm-Stadium in die Spinapfeilerwurzel. Diese vier Autoren betonen die exzentrische Lage des Reifezentrums, während *Andersen* [1963] angibt, das Reifezentrum liege beim 26-mm-Stadium «centrally in the scapula».

An den Rändern treten schubweise und ohne ersichtliche Regel Blastemstreifen auf. Bei mehreren Embryonen der Gruppen C bis E ist ein subperichondral-kostal gelegener Saum junger Knorpelzellen vorhanden, den auch *Ciardi-Dupré* [1942] bei einem 34-mm-Embryo beobachtet hat, ohne auf diese Erscheinung näher einzugehen. Bei einzelnen Embryonen der Gruppe E wird Perichondrium an gewissen randnahen Stellen «en bloc» zu Knorpelgewebe assimiliert (s. unten).

Spinapfeiler und Acromion

Der bereits im rein blastematösen Stadium der Scapulaanlage auftretende Spinapfeiler ist schon bei der Gruppe B als knorpelige, mächtige Anlage vorhanden und wird im Verhältnis zur Scapulaplatte bis zur Gruppe E noch etwas größer. Das erst bei der Gruppe B als dünne, blastematöse Platte erkennbare Acromion (in Übereinstimmung mit *Hagen* [1900]) zeigt sein größtes Wachstum bei der Gruppe C, wo es nur noch apikal blastematös ist. Bei den Gruppen D und E besteht es aus einer großen Knorpelplatte.

Bei mehreren Embryonen der Gruppe C tritt erstmals ein verschieden großer, inkonstanter, vertebralwärts gerichteter Knorpelsporn auf, der vom Spinapfeiler auf mittlerer Höhe abgeht (s. unten).

Die Knorpelreife nimmt von der Spinapfeilerwurzel mit zunehmendem Abstand vom Reifezentrum bis zum apikalsten Teil des Acromions kontinuierlich ab. Die Knorpelreifeverteilung verhält sich somit gleich wie in der Infraspinalplatte. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zur Angabe von *Olivier* [1962]: «Tout naturellement l'acromion aura un noyau cartilagineux spécial.» Das Größenwachstum des Acromions geht hingegen nicht parallel mit dem der Infraspinalplatte (vgl. *Zawisch* [1954]).

Processus coracoides

Im rein blastematösen Stadium der Scapulaanlage ist der *Processus coracoides* nicht sicher zu identifizieren. Er ist bei der Gruppe B im Verhältnis zur Scapulaplatte sehr groß und verliert dann, da er mit dem Wachstum der Scapulaplatte nicht Schritt hält, bei den Gruppen D und E relativ an Größe. Er verläuft von der Kostalfläche der Collumregion nach kostal, axillär und anfangs deutlich nach kau-

dal, was jedoch bei den Gruppen D und E nicht mehr zutrifft. Er besteht schon bei der Gruppe B vorwiegend aus Knorpel, dessen Reifegrad jedoch im Unterschied zum Acromion nicht kontinuierlich in den des angrenzenden Knorpelgewebes der Collumregion übergeht. Zwischen ihm und der Collumregion ist ein keilförmiges Gebiet unreiferen Gewebes interponiert, das – weniger deutlich – bis zu den reifsten Embryonen der Gruppe E verfolgbar ist.

Rutherford [1914], Subkowitsch [1931], Dijkstra [1923] und Olivier [1962] erwähnen die relative Größenabnahme des Processus coracoides bei Embryonen von 13 bis 30 mm SSL, die beiden erstgenannten Autoren auch seinen Verlauf und dessen Änderung während der Entwicklung. Sie bestätigen unsere Darstellung. Diese beiden Autoren und Zawisch [1954] beschreiben eine unvollständige Vereinigung des Processus coracoides mit der restlichen Scapula, unter ihnen am treffendsten Subkowitsch [1931] bei einem 18-mm-Embryo: «Im Gebiet der Cavitas glenoidalis ist die Grenze zwischen der Basis des Processus coracoides und der Scapula noch zu bemerken, da die Knorpelzellen an ihrer Verschmelzungsstelle sehr gestreckt sind.» Lewis [1901], Subkowitsch [1931] und Gardner und Gray [1953] berichten bei Embryonen mit 12 bis 16 mm SSL übereinstimmend von einem vorknorpeligen bis knorpeligen Processus coracoides mit einer blastematösen Spitze, was unseren Angaben entspricht.

Perichondrium und Ossifikationsbeginn

Entsprechend dem Entwicklungsmodus einzelner Scapulateile ist nur ein Teil des Perichondriums als hautartiger Überzug ausgebildet, während größere Gebiete von Perichondriumblastem über lange Zeit erhalten bleiben. Das die knorpeligen Teile einschließende Bildungsgewebe, Perichondrium im weiteren Sinne, weicht – wie oben erwähnt – bei den älteren von uns untersuchten Embryonen in seiner Form nur wenig vom Adultzustand der Scapula ab, wenn man von den Proportionen absieht.

Bereits bei der rein blastematösen Scapulaanlage zeigt das angrenzende Umgebungsgewebe eine gewisse Ordnung seiner Zellkerne, die auf der Kostalseite besser ausgeprägt ist als kutan. Diese Tatsache ist erwähnenswert, da auch später, vom ersten Auftreten des Knorpelgewebes bis zu den reifsten Embryonen der Gruppe E, eine kosto-kutane Differenz in der Ausbildung des Perichondriums bestehen bleibt, die sowohl den histologischen Aspekt wie auch den Ausfall der histochemischen Reaktionen betrifft.

Allgemein geht der Reifegrad des Perichondriums dem des überzogenen Knorpels parallel. Es findet sich daher in den Randgebieten auch bei den Embryonen der Gruppe E noch ein blastematöses Perichondrium. Größere Gebiete von Perichondriumblastem bleiben auch in der Spina- und Incisuraregion bestehen, sie haben jedoch wegen ihrer scharfen Abgrenzung gegen das Umgebungsgewebe, wegen ihrem ganz verschiedenen Bau und wegen ihrer anderen Funktion einen von den Randblastemen verschiedenen Charakter.

Bei den Embryonen der Gruppe B findet sich durchwegs ein einschichtiges Perichondrium, das kostal besser abgrenzbar ist als kutan. Ein zweischichtiges Perichondrium beobachteten wir ausnahmslos erst über Knorpel im Stadium II oder mehr, wobei das kutane Perichondrium schon über Knorpel im Stadium II, das kostale jedoch erst über Knorpel im Stadium V zweischichtig wird. Von dieser Regel gibt es eine Ausnahme: An Stellen, wo das kostale Perichondrium Einbuchtungen in der Scapulaplatte überspannt, kann es die gleiche Struktur annehmen wie auf der Kutanseite und dann schon über einem jüngeren Knorpelstadium (III und IV) zweischichtig werden. Von dieser Ausnahme abgesehen finden wir der obigen Regel entsprechend ein zweischichtiges Perichondrium auf der Kutanseite bei den Embryonen der Gruppen C bis E, auf der Kostalseite erst bei der Gruppe E. Nach *Streeter* [1949] bedeutet das Auftreten von zwei Schichten im Perichondrium des Humerus dessen Vorbereitung für die Ossifikation. Es ist anzunehmen, daß die kostokutanen Unterschiede in der Ausbildung des zweischichtigen Perichondriums der Scapula mit der aktiveren Chondrogenese auf der Kostalseite und der früher einsetzenden Ossifikation auf der Kutanseite zusammenhängt.

Bei den Embryonen der Gruppe D erscheinen als Vorläufer der Ossifikation zuerst im kutanen Perichondrium zwischen Spinawurzel und Spinapfeiler kleine Gefäße, deren Größe, Zahl und Ausdehnung bei den reiferen Embryonen zunimmt. Vom Ort ihres ersten Auftretens breiten sie sich vorerst im Perichondriumblastem der Incisuraregion, danach auch im zweischichtigen Perichondrium der Kostalseite und in der Umgebung der Spinapfeilerwurzel aus. Schließlich treten bei den reifsten Embryonen in derselben Reihenfolge und gleich lokalisiert, aber in etwas geringerer Ausdehnung Osteoblasten im Perichondrium auf, die teilweise unmittelbar an den Knorpel anstoßend Säume, teilweise frei im Blastem intraperichondrale Ossifikationsherde bilden. Bei den beiden reifsten Embryonen der Gruppe

E ist bereits eine dünne, kleine perichondrale Knochenmanschette zu beobachten, die an die intraperichondralen Ossifikationsherde Anschluß gewinnt. In diesem Zeitpunkt fällt der Kalknachweis sowohl im Knorpel wie in den Ossifikationsherden negativ aus.

Lewis [1901] und *Bardeen* [1910] erwähnen bei einem 11-mm-Embryo, daß das Perichondrium auf der Kostalseite dichter sei als kutan. *Ciardi-Dupré* [1942] gibt für Embryonen von 22 mm und mehr SSL an, daß Struktur und Dickenunterschiede des Perichondriums vorhanden sind, geht aber nicht näher darauf ein. *Zawisch* [1954] erwähnt erstmals bei einem 27-mm-Embryo das Auftreten eines zweischichtigen Perichondriums, was wir zum ersten Mal bei einem 19-mm-Embryo feststellten. Dagegen stimmen ihre Angaben über das erste Auftreten, Lokalisation und Ausbreitungsrichtung der Gefäße mit den unsrigen überein. *Andersen* [1963] stellt schon beim 23-mm-Stadium «ample vascularisation in the perichondria» von Humerus und Scapula fest. Eine reichliche Gefäßeinlagerung im Perichondrium der Scapula tritt nach unseren Beobachtungen erst deutlich später auf, d.h. bei Embryonen von ungefähr 28 mm SSL.

Bei *Rutherford* [1914], *Frey* [1919], *Ciardi-Dupré* [1942], *Gardner* und *Gray* [1953], *Zawisch* [1954] und *Andersen* [1963] herrscht Einigkeit über den Zeitpunkt des Beginns der Ossifikation im Perichondrium (um 30 mm SSL). Den Ort des ersten Auftretens und die Ausbreitungsrichtung der Ossifikationsherde geben *Frey* [1919] und *Zawisch* [1954] gleich an wie wir, während *Ciardi-Dupré* [1942] den Ausgangspunkt der Ossifikation in die Incisuraregion verlegt und eine Ausbreitung in kosto-kutaner Richtung beschreibt.

Zawisch [1954] führt bei der Beschreibung der Ossifikationsvorgänge aus: «Knapp vor dem 30-mm-Stadium beginnt die Ossifikation der Scapula. Sie verläuft nach dem perichondralen Typus ... Es legt sich zunächst ein ganz dünner, einheitlicher Knochenbelag an den präparatorisch veränderten Knorpel an. Dann aber bewirkt der Reichtum des Periostes an verhältnismäßig großen Gefäßen, daß die weitere Knochenbildung in Form eines groben Maschenwerkes erfolgt, die an endodesmale Knochenbildung erinnert.» Nach den Angaben der Autorin treten also bei Ossifikationsbeginn nacheinander auf: 1. «präparatorisch veränderter Knorpel», 2. perichondrale Knochenmanschette und 3. Knochenbildung in Form eines groben Maschenwerkes (entspricht den intraperichondralen Ossifikationsherden). Wir können diese Reihenfolge im Ablauf der Vorgänge bei Ossifikationsbeginn nicht bestätigen.

Die Autorin beschreibt bei Embryonen «knapp vor dem 30-mm-Stadium» einen «präparatorisch veränderten Knorpelherd», den sie als verkalkten Knorpel im reifsten Stadium definiert. *Andersen* [1963] hebt den späten Verkalkungsbeginn bei der Scapula hervor und setzt ihn auf das 38-mm-Stadium fest: «... it is not until the 38 mm stage that calcification occurs in the cartilaginous ground substance in the large endochondral centre in the body and spine.» Wir konnten bei 11 Embryonen von 27 bis 35 mm SSL nur beim längsten verkalkten Knorpel finden. Wenn *Zawisch* [1954] also bei Embryonen «knapp vor dem 30-mm-Stadium» verkalkten Knorpel nachweisen konnte, so dürfte es sich um große Ausnahmen gehandelt haben. Die Verkalkung des Knorpels darf daher nicht als erster Vorgang beim Ossifikationsbeginn der Scapula dargestellt werden. Zur Unterstützung unserer Aussage können wir Befunde auf nach *Kossa* behandelten Präparaten des obengenannten 35-mm-Embryos anführen, die zeigen, daß die Zone der Ossifikation über die Zone des verkalkten Knorpels hinausreicht. Auch *Krause* [1909] vertritt unsere Ansicht, wenn er schreibt: «Gegen das Ende der 10. Embryonalwoche ist an und unterhalb des Acromion eine Auflagerung von periostaler, netzartig angeordneter Knochensubstanz an die knorpelige Grundlage bemerkbar, noch ehe es in dieser selbst zur Verkalkung gekommen ist.»

Weiter ist der von *Zawisch* [1954] beschriebenen Reihenfolge der ersten Vorgänge bei der Ossifikation der Scapula entgegenzuhalten, daß wir bei vier Embryonen von 28 bis 34 mm SSL frei im Perichondrium liegende intraperichondrale Ossifikationsherde fanden, aber keine Andeutung einer perichondralen Knochenmanschette. Dagegen haben wir bei allen Embryonen mit einer perichondralen Knochenmanschette auch zahlreiche intraperichondrale Ossifikationsherde beobachtet. Wir schließen daraus, daß die intraperichondralen Ossifikationsherde vor der perichondralen Knochenmanschette auftreten.

Ordnen wir unsere Angaben, so kommen wir auf nachstehende Reihenfolge der Vorgänge bei Ossifikationsbeginn: 1. Bildung der intraperichondralen Ossifikationsherde, 2. Bildung der perichondralen Knochenmanschette und 3. Verkalkung des Knorpels im reifsten Stadium.

Spina

Bei der blastematösen Scapulaanlage von Embryo A1 ist der basale Teil des Spinapfeilers vorhanden. Der Spinapfeiler entspricht

bei der adulten Scapula dem verdickten axillären Rand der Spina, dem apikal das Acromion aufsitzt. Bei der Gruppe B ist von der Spina außer einem knorpeligen Spinapfeiler vorerst nur ein eben erkennbares Blastem auf Höhe der Spinawurzel vorhanden, das als Anlage der Spinaleiste vom Spinapfeiler aus wenig weit vertebralwärts reicht. Etwas später tritt bei derselben Gruppe inkonstant ein nach vertebral gerichteter Knorpelsporn am Spinapfeiler auf, an den das jetzt schon deutlichere Spinablastem anschließt. Bei den folgenden Gruppen dehnt sich das Spinablastem, dessen Begrenzung zunehmend schärfer wird, mehr und mehr vertebralwärts aus, bis es schließlich den Margo vertebralis erreicht. In der MP- und in der PAS-Färbung wird seine Abgrenzung erleichtert durch die Pyroninophilie des Cytoplasmas seiner Zellen und durch die Ablagerung PAS-positiver Granula im Zwischenkernraum.

Beim Vergleich mit den Angaben in der Literatur muß berücksichtigt werden, daß sämtliche Autoren Spinapfeiler und Acromion als «Acromion» (resp. «Processus acromialis») bezeichnen, mit Ausnahme von *Olivier* [1962], der zwischen Spinasteil und apikalwärts anschließendem Acromion klar unterscheidet. *Hochstetter* [1952] beschreibt bei einem Embryo von 10,4 mm eine Spinaanlage: «... N. suprascapularis, und daß das Blastem, um welches sich sein ... Endast herumschlingt, nichts anderes sein könne, als die Spina scapulae.» Die von ihm beschriebene Lage des Blastems entspricht genau der Stelle, wo wir beim Embryo A1 den basalen Teil des Spinapfeilers beobachtet haben (vgl. Abb. 3). *Olivier* [1962] hebt hervor, der Spinapfeiler entstehe erst beim 12-mm-Stadium «sous forme d'un gros tubercule dorsale». Nach seiner Beschreibung wird diese dorsale Erhebung beim 13-mm-Stadium zu einer aufragenden Säule («colonne ascendante»), die dem axillären Rand der Spina des Erwachsenen entspricht. Abgesehen vom Zeitpunkt des ersten Auftretens einer Spinaanlage stimmen diese Angaben mit unserer Darstellung überein. Beim 27-mm-Stadium beschreibt derselbe Autor das erstmalige Auftreten einer Scheidewand (cloison) zwischen den Mm. supra- und infraspinatus, ohne histologische Angaben zu machen. Diese Scheidewand entspricht wahrscheinlich dem von uns beschriebenen Spinablastem. Einzig bei *Rutherford* [1914] konnten wir eine Beschreibung des Spinablastems und eine Erwähnung des vertebralwärts gerichteten Knorpelsporns finden. Er stellt bei einem 30-mm-Embryo fest: «The right angle-bend ... is now a sharp projecting elbow or spur of cartilage connecting with a tract of young, actively growing cells

which passes backwards over the dorsum scapulae, under cover of the small celled fibrous intersection ... nearly to the vertebral border. This tract represents the developing spine, ...» Seine Angaben decken sich mit den unsrigen.

Der Ausfall der histochemischen Reaktionen

Perichondrium

Im Cytoplasma des kostalen Perichondriums sind mit zunehmender Reife des überzogenen Knorpels reichlicher pyroninophile, PAS-positive und Glykogen-positive Granula eingelagert, die im kutanen Perichondrium stark vermindert sind oder fehlen. Bei der Alcianblau-Reaktion ist das Cytoplasma des gesamten Perichondriums vollständig negativ.

Knorpel

Die Interzellularsubstanz ist mit zunehmender Reife bei der MP-Reaktion stärker metachromatisch, bei der PAS- und Glykogen-Reaktion stärker positiv bis zum Stadium V, bei der Alcianblau-Reaktion jedoch durchschnittlich nur bis zum Stadium II stärker positiv.

Das Cytoplasma reagiert bis zum Stadium III stärker pyroninophil, resp. Alcian- und Glykogen-positiv. Danach verringert sich seine positive Reaktion bei der MP- und Alcianblau-Färbung in den reifsten Stadien (IV und V), während es sich bei der Glykogen-Färbung in den Stadien IV und V unterschiedlich stark positiv verhält. Seine PAS-positive Reaktion nimmt von Stadium A bis V kontinuierlich zu.

Im Zwischenkernraum der Stadien A bis I sind vorzugsweise auf der Kostalseite PAS- (resp. Glykogen-)positive Granula an bestimmten Stellen eingelagert.

Blastem

Bei gewissen, unterschiedlich lokalisierten Blastemen, vorwiegend im Spina- und Randgebiet, findet sich ein pyroninophiles Cytoplasma und eine Einlagerung PAS-positiver Granula im Zwischenkernraum.

Die obigen Angaben sind summarisiert. Unser histochemisch aufgearbeitetes Untersuchungsmaterial ist zu klein, um allgemeingültige Beziehungen zwischen Knorpelstadium und Ausfall der histo-

chemischen Reaktionen aufzustellen. Wir haben beobachtet, daß der Ausfall der histochemischen Reaktionen nicht nur vom Reifezustand des betrachteten Knorpelgebietes, sondern auch vom Knorpelstadium im Reifezentrum abhängig ist. Darüber hinaus bestehen lokale Unregelmäßigkeiten im Ausfall der histochemischen Reaktionen.

Regionale Unterschiede im Ausfall der histochemischen Reaktionen

Während die Pyroninophilie des Cytoplasmas bei der MP-Reaktion als spezifisch für das Vorhandensein von RNS gelten darf (Pearse [1961]), so daß aus ihrer Zunahme auf eine erhöhte Zellaktivität geschlossen werden kann, ist die Spezifität der übrigen oben genannten Reaktionen gering oder umstritten. Wir begnügen uns daher damit, den Ausfall dieser Reaktionen als Indikator für die unterschiedliche Zellaktivität zu nehmen.

Wir haben die bei allen Gruppen auftretenden kosto-kutanen Unterschiede bereits erwähnt. Sie sollen hier zusammen besprochen werden. An histologischen Unterschieden finden sich eine konstant verschiedene Struktur des Perichondrium costale gegenüber dem Perichondrium cutaneum bei allen Reifegraden und das inkonstante Auftreten eines subperichondralen Saumes junger Knorpelzellen bei den Gruppen C bis E. An histochemischen Unterschieden ist vor allem die viel stärkere Pyroninophilie des Cytoplasmas sowie die Einlagerung von PAS- und Glykogen-positiven Granula im Perichondrium costale und die stärkere Metachromasie der Knorpelinterzellulärsubstanz bei allen Gruppen hervorzuheben.

Wo ein subperichondral-kostaler Saum vorhanden ist, fällt er durch die stärkere Pyroninophilie des Cytoplasmas seiner Knorpelzellen auf. Dazu zeigt seine Interzellulärsubstanz eine stärkere Metachromasie und eine verstärkt positive Reaktion bei der Alcianblau-Färbung. Interessant ist der gegenteilige Ausfall sämtlicher Reaktionen bei einem Embryo.

Aus diesen Tatsachen folgern wir, daß das Perichondrium costale bis zum Ossifikationsbeginn eine höhere Aktivität bezüglich der Chondrogenese zeigt als das kutane und daß auf der Kostalseite zeitweise eine Art der Knorpelbildung stattfindet, die auf der Kutanseite oder vergleichsweise beim Humerus nicht vorkommt.

Für weitergehende Folgerungen ist unser histochemisch aufgearbeitetes Material zu klein. Bringen wir unsere Befunde in einen Zusammenhang, so ergibt sich folgende Annahme:

Von einem bestimmten Zeitpunkt der Entwicklung werden vom

Perichondrium costale schubweise Lagen von jungen Knorpelzellen an älteres Knorpelgewebe apponiert, die sehr rasch dieselbe Reife erreichen wie die Nachbarzellen. In der Folge ist der subperichondral-kostale Saum neu apponierter Knorpelzellen bald nach seiner Entstehung nicht mehr vom Nachbargewebe unterscheidbar, was einerseits sein inkonstantes Auftreten bei verschiedenen Embryonen und andererseits das unterschiedliche Verhalten der Metachromasie seiner Interzellulärsubstanz erklärt. Der Ausfall der metachromatischen Reaktion variiert je nach der Entwicklungsphase, in welcher sich der untersuchte Embryo gerade befindet. Wurde der subperichondrale Saum eben erst apponiert, so ist die Metachromasie seiner Interzellulärsubstanz schwächer, steht er unmittelbar vor dem Ausgleich der Reife, so ist sie wegen der Anhäufung von metachromatisch reagierenden Substanzen stärker als im angrenzenden Knorpelgewebe. Dasselbe gilt für den Ausfall der Alcianblau-Reaktion.

Durch die Annahme einer beschleunigten Knorpelreifung unter dem kostalen Perichondrium wird auch die bei allen Embryonen beobachtete stärkere metachromatische Reaktion auf der Kostalseite erklärt.

Mit unserer Annahme stimmte ferner das frühere Auftreten der Ossifikation auf der Kutanseite überein. Es ergäbe sich die Vorstellung, daß das Perichondrium costale vor Ossifikationsbeginn den größten Teil des Knorpelgewebes produziert, während sich in der gleichen Zeit im kutanen Perichondrium hauptsächlich die Knochenbildung vorbereitet. Diese Vorstellung wird auch durch den histologischen Aspekt von kutanem und kostalem Perichondrium wahrscheinlich gemacht.

Kurz vor Ossifikationsbeginn ist auf der Kostal- und Kutanseite in den Randgebieten eine weitere eigenartige Form der Knorpelapposition – ausschließlich an junge Knorpelstadien – zu beobachten: Ganze Abschnitte des Perichondriums werden auf ein Mal zu einem Knorpelgewebe, dessen Zellen noch das gleiche Aussehen haben wie im Perichondrium, das sich jedoch histochemisch wie unreifes Knorpelgewebe verhält. Dieser Vorgang, den wir als Assimilation «en bloc» bezeichnet haben, spielt sich bei einzelnen Embryonen der Gruppe E vorwiegend im Randgebiet der Supraspinalplatte und am Angulus caudalis ab.

Auch wenn wir unsere obenstehenden Annahmen nicht berücksichtigen, können wir zusammenfassend feststellen, daß uns der Ausfall der histochemischen Reaktionen gewichtige Argumente für das

Vorliegen einer histologischen Frühentwicklung der Scapula gibt, die in wesentlichen Punkten von der eines langen Röhrenknochens verschieden ist.

Ich danke Herrn Prof. K. S. Ludwig herzlich für seine Beratung und seine Bemühungen bei der Ausführung dieser Arbeit.

Der Firma Robapharm AG, Basel, sind wir für ihren Beitrag an die Publikationskosten sehr dankbar.

Zusammenfassung

In ihrer Frühentwicklung verhält sich die Scapula des Menschen keineswegs wie ein einheitliches Skeletstück. Zur Beschreibung der Entwicklungsvorgänge müssen daher einzelne Scapulateile unterschieden werden; insbesondere eine Supra- und Infraspinalplatte, ein Processus coracoides und eine Spina mit Acromion. Die blastematösen Anlagen dieser Scapulateile treten nicht gleichzeitig im Skeletblastem auf: die Scapulaplatte und der axillärste Teil der Spina (Spinapfeiler) erscheinen vor dem Processus coracoides und dem Acromion. Der vertebral vom Spinapfeiler gelegene Teil der Spina ist schon früh als Spinablastem angelegt, das aber erst bei Embryonen von ungefähr 30 mm SSL bis zum Margo vertebralis reicht. Im Laufe der Frühentwicklung werden die Scapulaplatte (mit Ausnahme der axillären Supraspinalplattenhälfte), der Spinapfeiler mit dem kranial anschließenden Acromion und der Processus coracoides knorpelig vorgebildet, während das Spinablastem in der gleichen Zeit nur einen vom Spinapfeiler wegziehenden, vertebralwärts wachsenden Knorpelsporn erhält. Der Beginn und der Verlauf der Knorpelbildung in den einzelnen Scapulateilen ist zeitlich verschieden. Zuerst findet sich Knorpel in der Scapulaplatte und im Spinapfeiler, danach im Processus coracoides und schließlich im Acromion.

Aus einer einheitlichen blastematösen Anlage entwickeln sich in der Supraspinalplatte vier Anteile, die durch unreiferes Gewebe voneinander getrennt sind und erst später durch Ausgleich der Knorpelreife in verschiedener Kombination mehr und mehr zu einer einheitlichen Platte verschmelzen. Findet dieser Ausgleich der Reife lokalisiert verzögert statt, so kommt es vorübergehend zu einer Schlitzbildung in der Supraspinalplatte.

Während die Knorpelreife in der Infraspinalplatte, in gewissen Anteilen der Supraspinalplatte und im Spinapfeiler samt dem Acromion mit zunehmendem Abstand vom Reifezentrum in der Spinapfeiler-Wurzel abnimmt, halten sich der Processus coracoides und Anteile der Supraspinalplatte nicht an diese Reifeverteilung. Diese Scapulateile zeigen somit eine gewisse Eigenständigkeit, die sich auch in ihrer eigenen Wachstumsgeschwindigkeit widerspiegelt.

Die Chondrogenese der Scapulaplatte ist, obwohl bei ihr auch die Streeter'schen Stadien auftreten, wesentlich verschieden von der des Humerus. Strukturunterschiede zwischen kostalem und kutanem Perichondrium, das Auftreten eines subperichondral-kostal gelegenen Saumes junger Knorpelzellen und die sowohl im Knorpel wie im Perichondrium vorhandenen kosto-kutanen Differenzen im Ausfall der histochemischen Reaktionen lassen den Schluß zu, daß bis zum Ossifikationsbeginn vor allem von der Kostalseite her Knorpel an die Scapulaplatte apponiert wird. Da zudem die Ossifikation im kutanen Perichondrium beginnt, ist auf eine

weitgehende funktionelle Spezialisierung von kostalem und kutanem Perichondrium zu schließen.

Als erste Vorgänge beim Beginn der Ossifikation treten nacheinander auf: intraperichondrale Ossifikationsherde, die frei im Perichondriumblastem liegen und mit der desmalen Knochenbildung vergleichbar sind, danach perichondrale Knochenplatten und erst dann die Verkalkung der reifsten Knorpelinterzellulärsubstanz.

Summary

In its early development the human scapula does not at all behave as a uniform skeletal piece. In order to describe the processes of development individual portions of the scapula must therefore be distinguished; particularly a supra- and infraspinal lamina, a processus coracoides and a spina with acromion. The blastema rudiments of these portions of the scapula do not appear simultaneously in the skeletal blastema: the lamina of the scapula and the most axillary portion of the spina (spinal pillar) appear before the processus coracoides and the acromion. The portion of the spina lying vertebral from the spinal pillar is laid down relatively early as spina-blastema, extending to the margo vertebralis first in embryos of approximately 30 mm SSL. In the course of the early development the lamina of the scapula (with exception of the axillary half of the supraspinal lamina), the spinal pillar with the cranially associated acromion and the processus coracoides are formed of cartilage, while at the same time the spina-blastema acquires only a cartilaginous spur which grows vertebralwards from the spinal pillar. The commencement and the course of cartilage formation in the individual portions of the scapula are different with respect to time. Cartilage is first found in the lamina of the scapula and in the spinal pillar, later in the processus coracoides and finally in the acromion.

Out of a uniform blastema rudiment four sections develop in the supraspinal lamina which are separated from one another by immature tissue; this is later neutralized as a result of cartilage maturation in different combinations, and they fuse to form a uniform lamina. If this neutralisation through maturation is locally retarded, transitory cleft formation in the supraspinal lamina occurs.

The maturation of cartilage in the infraspinal lamina, in certain portions of the supraspinal lamina and in the spinal pillar including the acromion decreases as the distance from the maturation center in the spinal pillar root increases; the processus coracoides and portions of the supraspinal lamina, however, do not partake in this distribution of maturation. The latter exhibit a certain amount of independence which is also reflected in their own rapidity of growth.

The chondrogenesis of the scapular lamina is essentially different from that of the humerus, even though the Streeter-stages occur in the former. Structural differences between the costal and cutaneous perichondrium, the appearance of a subperichondral-costal border of young chondrocytes and the existing costo-cutaneous differences in the results of histochemical reactions in the cartilage, as well as in the perichondrium, allow the conclusion that up until the commencement of ossification, cartilage is formed on the scapular lamina through appositional growth, particularly from the costal side. Since ossification begins in the cutaneous perichondrium, a far-reaching functional specialisation of the costal and the cutaneous perichondrium can be concluded.

The initial processes in the commencement of ossification appear in the following sequence: intraperichondral ossification foci which lay freely in the perichondrium-blastema and are comparable with the desmal bone formation, then perichondral bone trabeculae and finally calcification of the maturest cartilage intercellular substance.

Résumé

Au cours des stades précoces de son développement l'omoplate humaine ne se comporte pas comme une pièce squelettique unique. En conséquence, il convient de distinguer plusieurs portions de cet os, plus particulièrement une plaque supraspinale, une plaque infrapspinale, le processus coracoïdien et une épine avec l'acromion. Les ébauches de ces diverses parties n'apparaissent pas toutes en même temps: la plaque scapulaire et la portion axillaire de l'épine (pilier de l'épine) apparaissent avant le processus coracoïdien et l'acromion. La portion de l'épine, située en position vertébrale par rapport au pilier de l'épine, se rencontre de façon précoce comme blastème de l'épine qui n'atteint le bord vertébral que chez les embryons de 30 mm environ (longueur céphalo-coccygienne). Au cours du développement la plaque scapulaire (exception faite de la moitié axillaire de la plaque supraspinale), le pilier de l'épine avec l'acromion et le processus coracoïdien sont constitués par du cartilage, tandis que le blastème de l'épine présente au même moment un éperon cartilagineux partant du pilier et avançant en direction vertébrale. Le début et l'évolution des ébauches cartilagineuses des différentes parties de l'omoplate diffèrent dans le temps. On trouve du cartilage tout d'abord dans la plaque scapulaire et dans le pilier de l'épine, ensuite dans le processus coracoïdien et pour finir dans l'acromion.

Quatre portions se développent aux dépens d'un blastème uniforme dans la plaque supraspinale; elles sont séparées les unes des autres par du tissu indifférentié et ne s'unissent que plus tard, une fois que la maturité du cartilage s'adapte pour former une plaque uniforme. Si la maturation du cartilage n'est pas égale et qu'elle soit retardée en un point, il peut se produire une fente transitoire dans la plaque supraspinale.

Tandis que la maturation du cartilage au niveau de la plaque infrapspinale, dans certaines portions de la plaque supraspinale et du pilier de l'épine ainsi que dans l'acromion diminue plus la distance du centre de maturation, localisé dans la racine du pilier spinal, augmente, le processus coracoïdien et des portions de la plaque supraspinale ne participent pas à cette «distribution de la maturation». Ces parties de l'omoplate présentent ainsi une certaine indépendance, que reflète entre autres la rapidité de sa croissance propre.

Bien que la chondrogénèse de la plaque scapulaire présente aussi les cinq stades décrits par Streeter elle est très différente de celle de l'humérus. Des différences de structure entre le périchondre costal et cutané, l'apparition d'une bordure de cellules cartilagineuses jeunes dans les couches subpérichondrales costales, ainsi que des différences dans les réactions histochimiques observées tant au niveau du cartilage que dans le périchondre selon les régions étudiées (costales ou cutanées), toutes ces différences permettent la conclusion suivante: jusqu'à l'apparition de l'ossification, l'apposition de cartilage s'effectue au niveau de la plaque scapulaire surtout du côté costal. Comme l'ossification débute au niveau du périchondre cutané, il

faut en plus admettre une spécialisation fonctionnelle très particulière du péri-chondre costal et du périchondre cutané.

Les premiers phénomènes qui entrent en jeu au début de l'ossification sont dans l'ordre de leur apparition: des foyers d'ossification intrapérichondraux situés librement dans le blastème du périchondre et comparables aux foyers d'ossification membraneuse; des plaques osseuses périchondrales; c'est ensuite seulement que se calcifie la substance fondamentale du cartilage.

Literatur

- Alverdes, K.*: Grundlagen der Anatomie (Thieme, Leipzig 1959).
- Andersen, H.*: Histochemical studies on the histogenesis of the knee joint and superior tibio-fibular joint in human fetuses. *Acta anat.* 46: 279–303 (1961). – Histochemistry and development of the human shoulder and acromioclavicular joints with particular reference to the early development of the clavicle. *Acta anat.* 55: 124–165 (1963).
- Bardeen, C. R.*: In *Keibel und Mall's Hb. der Entwicklungsgeschichte des Menschen*, vol. I (Hirzel, Leipzig 1910).
- Bardeleben, K.*: Lehrbuch der systematischen Anatomie des Menschen (Urban & Schwarzenberg, Berlin/Wien 1906).
- Benninghoff, A. und Goertler, K.*: Lehrbuch der Anatomie des Menschen (Urban & Schwarzenberg, München/Berlin/Wien 1960).
- Bryce, T. H.*: in *Quain's Elements of anatomy*, vol. IV/1 (Longmans Green, London 1915).
- Ciardi-Dupré, G.*: Sullo sviluppo della scapola dell'uomo con riferimento alle modalità della inserzione laterale del m. omoioideo. *Arch. ital. Anat. Embriol.* 47: 499–553 (1942). – Modification in form of human scapula during ontogenesis. *Boll. Soc. ital. Biol. sper.* 17: 348–349 (1942).
- Corning, H. K.*: Lehrbuch der Entwicklungsgeschichte des Menschen (Bergmann, München 1925).
- Dijkstra, O. H.*: De ontwikkeling van het schouderblad bij den mensch. Verslag van de gewone vergaderingen der wis- en natuurkundige afdeeling; Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam 32: 321–332 (1923).
- Fawcett, E.*: A model of a shoulder girdle of a 19 mm embryo. *J. Anat., Lond.* 44: 204–205 (1910).
- Fischel, A.*: Grundriß der Entwicklung des Menschen (Springer, Berlin 1937).
- Frey, H.*: Zur Entwicklung der menschlichen Unterzungensbeinmuskeln und der ihnen verbundenen Skeletteile (Scapula, Thorax, Kehlkopf). *Morph. Jb.* 50: 501–516 (1919).
- Gardner, E. and Gray, D. J.*: Prenatal development of human shoulder and acromioclavicular joints. *Amer. J. Anat.* 92: 219–276 (1953).
- Gegenbaur, C.*: Lehrbuch der Anatomie des Menschen (Engelmann, Leipzig 1899).
- Hagen, W.*: Die Bildung des Knorpelskelets beim menschlichen Embryo. *Arch. Anat. Physiol. anat. Abt.* pp. 1–40 (1900).
- Hamilton, W. J.*: Human embryology (Heffer, Cambridge 1956).
- Hertwig, O.*: Lehrbuch der Entwicklungsgeschichte des Menschen und der Wirbeltiere (Fischer, Jena 1906).
- Hochstetter, F.*: Über die Entwicklung der Form der menschlichen Gliedmassen, *Oest. Akad. Wiss. math.-naturw. Kl. Denkschr.* 109/4. Abh.: 1–35 (1952).

- Hyrtl, J.*: Lehrbuch der Anatomie des Menschen (Braumüller, Wien 1887).
- Krause, W.*: in *Bardeleben's Hb. der Anatomie des Menschen*, vol. I/3 (Fischer, Jena 1909).
- Langer, C. und Toldt, C.*: Lehrbuch der systematischen und topographischen Anatomie (Braumüller, Wien/Leipzig 1921).
- Lewis, W.H.*: The development of the arm in man. *Amer. J. Anat.* 1: 144–184 (1901).
- Lison, L.*: Histochimie et cytochimie animales (Gauthier-Villars, Paris 1953).
- Nauck, E.T.*: Das Coracoideum der Säuger. *Anat. Anz.* 61: Erg. H. 208–213 (1926).
– in *Bolk, Goepfert, Kallius und Lubosch's Hb. der vergleichenden Anatomie der Wirbeltiere*, vol. V (Urban & Schwarzenberg, Berlin/Wien 1938).
- Olivier, G.*: Formation du squelette des membres (Vigot, Paris 1962).
- Pearse, A.G.E.*: Histochemistry theoretical and applied (Churchill, London 1961).
- Rauber, A.*: Lehrbuch der Anatomie des Menschen (Thieme, Leipzig 1902).
- Romeis, B.*: Mikroskopische Technik (Leibniz, München 1948).
- Rutherford, N.C.*: A contribution to the embryology of the forelimb skeleton. *J. Anat., Lond.* 48: 355–377 (1914).
- Schenk, R.*: Implantation und deciduale Reaktion in der Embryonalentwicklung des Goldhamsters. *Z. Anat. EntwGesch.* 120: 75–94 (1957).
- Sobotta, J.*: Kurzes Lehrbuch der deskriptiven Anatomie des Menschen (Lehmann, München 1921).
- Streeter, G.L.*: A review of the histogenesis of cartilage and bone. Developmental horizons in human embryos (fourth issue). *Carneg. Inst. Publ. No. 583, Contrib. Embryol.* 33: 149–168 (1949). – Description of age group XI to XXIII. Developmental horizons in human embryos (fifth issue). *Carneg. Inst. Publ. No. 592, Contrib. Embryol.* 34: 165–196 (1951).
- Subkowitsch, E.M.*: Zur Frage der Morphologie des Schultergürtels; I. Entwicklung und Morphologie des Processus coracoides bei Mensch und Fledermaus. *Morph. Jb.* 65: 517–538 (1931).
- Testut, L. et Latarjet, A.*: Traité d'Anatomie humaine (Doin, Paris 1948).
- Vesalius, A.*: De humani corporis fabrica (Oporinus, Basel 1555).
- Zawisch, C.*: Die Morpho- und Histogenese der menschlichen Scapula. *Acta anat.* 22: 300–328 (1954).

Eingegangen 1. August 1965

Adresse des Autors: Dr. P. Elmiger, Anatomisches Institut der Universität, Pestalozzistraße 20,
4000 Basel (Schweiz)

